

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas  
Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico

**DISEÑO UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CON SUPERCAPACITORES  
PARA UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA QUE ALIMENTE UNA CARGA DE  
DEMANDA VARIABLE.**

Trabajo de grado presentado ante la Universidad Técnica del Norte previo a la  
obtención del título de grado de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico.

Autor:  
Luis Anibal Orbe Chamorro

Director:  
M.Sc. MIGUEL EMILIO VIVERT DEL PINO

Ibarra-Ecuador  
2020



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que se publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:		0401655931	
APELLIDOS Y NOMBRES:		Orbe Chamorro Luis Anibal	
DIRECCIÓN:		San Gabriel - Cristóbal Colón - Calle Carchi	
EMAIL:		laorbec@utn.edu.ec	
TELÉFONO FIJO:	(06) 2220-147	TELÉFONO MÓVIL:	+593 979905316


DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	DISEÑO UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CON SUPERCAPACITORES PARA UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA QUE ALIMENTE UNA CARGA DE DEMANDA VARIABLE.
AUTOR (ES):	Orbe Chamorro Luis Anibal
FECHA: DD/MM/AAAA	30/09/2020
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSTGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico
ASESOR/DIRECTOR	M.Sc. Miguel Emilio Vivert Del Pino

## 2. CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 30 días del mes de septiembre de 2020

**EL AUTOR:**

  
.....  
Luis Anibal Orbe Chamorro  
040165593-1



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO**

Yo, Miguel Vivert en calidad de tutor del señor estudiante, Luis Anibal Orbe Chamorro certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **"DISEÑO UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CON SUPERCAPACITORES PARA UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA QUE ALIMENTE UNA CARGA DE DEMANDA VARIABLE."** Para la obtención del título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico; aprobando la defensa, impresión y empastado.

M.Sc. Miguel Vivert

**DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO**

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mi padre Anibal y madre Alicia, por ser el apoyo incondicional para mi formación, pero sobre todo su amor y cariño a mi hermanas, Fernanda y Mayra por estar junto conmigo y confiar en mí, a mi familia y amigos.

*Luis Orbe*

## **Agradecimientos**

Agradezco a Dios por la salud y vida. A mi querida la Universidad Técnica del Norte por abrirme las puertas y permitirme formar parte de esa gran familia, A mis docentes por compartir su conocimiento y apoyo durante mi formación académica.

Un agradecimiento especial a mi tutor M.Sc. Miguel Vivert por demostrar su interés y haberme guiado en la elaboración de este proyecto.

Quiero agradecer a mis padres quienes me han brindado su apoyo emocional y económico para culminar esta etapa. Finalmente, a mi familia por estar pendiente de mi bienestar y siempre acompañarme en los momentos más importantes de mi vida, A mi enamorada por su apoyo y gran amor.

*Luis Orbe*

## TABLA DE CONTENIDOS

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA .....	I
CONSTANCIA.....	II
CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO .....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTOS .....	V
RESUMEN .....	XIII
ABSTRACT .....	XIV
INTRODUCCIÓN .....	XV
A.1. CONTEXTUALIZACIÓN.....	XV
A.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. ....	XV
A.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA. ....	XVI
A.4. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.....	XVI
A.5. ALCANCE DEL TRABAJO.....	XVII
A.6. OBJETIVO GENERAL. ....	XVII
A.7. OBJETIVOS ESPECÍFICOS. ....	XVII

## CAPÍTULO I ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

Introducción. ....	1
1.1. Sistemas fotovoltaicos. ....	1
1.1.1. Sistema fotovoltaico autónomo (SFA).....	2
1.1.2. Sistemas fotovoltaicos conectados a la red (SFCR). ....	2
1.1.3. Sistemas fotovoltaicos híbridos (SFH). ....	2
1.2. Componentes de un sistema fotovoltaico.....	3
1.2.1. Paneles Fovoltaicos.....	3
1.2.2. Técnicas de seguimiento de punto de máxima potencia.....	5
1.2.3. Conversores. ....	6
1.2.4. Sistemas de almacenamiento.....	10
1.3. Topologías de sistemas de almacenamiento en instalaciones fotovoltaicas.....	15
1.3.1. Topología 1. ....	15
1.3.2. Topología 2. ....	16
1.3.3. Topología 3. ....	17
1.4. Cargas variables. ....	18
1.4.1. Tipos de cargas en AC. ....	19
1.4.2. Tipos de cargas en DC.....	19
1.5 Resumen del capítulo I. ....	19

## CAPÍTULO II METODOLOGÍA

2.1. Circuito propuesto.....	20
2.1.1. Diseño de la matriz fotovoltaica. ....	22
2.1.2. Diseño de sistemas de almacenamiento de energía.....	27
2.2. Diseño del circuito electrónico.....	30
2.2.1. Diseño del convertidor elevador. ....	30
2.2.2. Diseño de los convertidores DC/DC tipo C. ....	32
2.3 Resumen del capítulo II. ....	38

## CAPÍTULO III RESULTADOS

3.1 Esquema del sistema de simulación baterías y supercapacitores. ....	39
3.2 Simulación de la matriz fotovoltaica. ....	40
3.2.1 Técnica del control MPPT.....	41
3.4 Banco de baterías.....	44
3.5 Banco de supercapacitores.....	45
3.6 Diseño del controlador de los convertidores DC/DC tipo C Bidireccionales.....	46
3.7 Evaluación y resultados. ....	57
3.7.1 Caso 1. Variación en generación fotovoltaica. ....	57
3.7.2 Caso 2. Variación en la carga.....	58
3.10 Resumen del capítulo III.....	62

CONCLUSIONES .....	63
RECOMENDACIONES .....	63
BIBLIOGRAFÍA .....	64
ANEXOS.....	68



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Elementos básicos de un sistema fotovoltaico.....	2
Fig. 2 Corte transversal de un panel fotovoltaico .....	4
Fig. 3 Conexiones de paneles fotovoltaicos.....	4
Fig. 4 Conversor DC/DC reductor. a) Diagrama del circuito, b) Circuitos equivalentes. ....	7
Fig. 5 Conversor DC/DC elevador. a) Diagrama del circuito, b) Circuitos equivalentes c) Formas de onda. ....	8
Fig. 6 Conversor DC/DC tipo C.....	9
Fig. 7 Clasificación de los convertidores DC/AC.....	10
Fig. 8 Supercapacitor de doble capa. ....	12
Fig. 9 Diagrama de Rangone: Densidad de potencia vs Densidad de Energía.....	14
Fig. 10. Baterías y supercapacitores. ....	15
Fig. 11 Sistema fotovoltaico con almacenamiento híbrido y conectado a la red.....	16
Fig. 12 SFA con almacenamiento híbrido a) Sistema para cargas DC, b) Sistema para cargas AC. ....	17
Fig. 13 Sistema fotovoltaico autónomo con tres distintos tipos de almacenamiento. ....	18
Fig. 14 Ejemplo de carga variable .....	19
Fig. 15 Sistema fotovoltaico autónomo con almacenamiento híbrido.....	21
Fig. 16 Matriz fotovoltaica.....	24
Fig. 17 Circuito equivalente de un panel fotovoltaico.....	24
Fig. 18 Funcionamiento del algoritmo perturbar y observar. ....	26
Fig. 19 Diagrama de flujo del funcionamiento P&O.....	26
Fig. 20 Banco de baterías.....	28
Fig. 21. Modelo de una Batería.....	28
Fig. 22 Modelo de un supercapacitor.....	30
Fig. 23 Conversor DC/DC elevador. ....	31
Fig. 24 Simulación Convertidor DC/DC elevador. ....	32
Fig. 25 Simulación de corriente Conversor elevador.....	32
Fig. 26 Conversor DC/DC tipo C para las baterías. ....	34
Fig. 27 Simulación del convertido Bidireccional del banco de baterías. ....	35
Fig. 28 Simulación de corriente Converso batería. ....	35
Fig. 29 Conversor DC/DC tipo C para supercapacitores.....	36
Fig. 30 Simulación del convertidor bidireccional del banco de supercapacitores. ....	37
Fig. 31 Simulación de corriente conversor bidireccional Supercapacitores.....	37
Fig. 32 Diseño DE la matriz Fotovoltaica Conversores y Bancos de almacenamiento....	38
Fig. 33 Esquema del sistema FV, baterías, Supercapacitor.....	39

Fig. 34 Matriz fotovoltaica, conversor DC/DC elevador en Matlab-Simulink.....	40
Fig. 35 Parámetros PV Array .....	40
Fig. 36 Irradiación y temperatura de la matriz fotovoltaica .....	41
Fig. 37 Curvas I-V y P-V de la matriz fotovoltaica .....	41
Fig. 38 MPPT (Perturbar y Observar) .....	42
Fig. 39 Potencia ideal en comparación con la potencia de la matriz fotovoltaica. ....	42
Fig. 40 Eficiencia del algoritmo P&O, Potencia de la matriz fotovoltaica.....	43
Fig. 41 Voltaje de la matriz fotovoltaica. ....	43
Fig. 42 Conversor DC/DC elevador .....	44
Fig. 43 Banco de Baterías .....	44
Fig. 44 Parámetros de cada batería. ....	45
Fig. 45 Banco de supercapacitores. ....	45
Fig. 46 Parámetros del Banco de supercapacitores.....	46
Fig. 47 conversores DC/DC tipo C bidireccionales .....	46
Fig. 48 Conversor DC/DC Bidireccional S1 No conduce S2 conduce. ....	47
Fig. 49 Conversor bidireccional S1 conduce S2 no conduce. ....	47
Fig. 50 Bucle de control de corriente de la batería.....	48
Fig. 51 Diagrama de bode función de transferencia vs función de transferencia aproximada. .....	49
Fig. 52 Diagrama de bode para el diseño de controlador Pi de lazo de control del banco de baterías. ....	50
Fig. 53 Respuesta para el control PI lazo de control de la batería. ....	50
Fig. 54 Bucle de control de corriente del supercapacitor .....	51
Fig. 55 Diagrama de bode de la función de transferencia real vs la función aproximada.52	
Fig. 56 Diagrama de bode función de transferencia vs función de transferencia aproximada. .....	52
Fig. 57 Respuesta Pi para el control del supercapacitor .....	53
Fig. 58 Bloque de diagramas de control de voltaje SC. ....	53
Fig. 59 Diagrama de bode de la fusión de transferencia de lazo de control de la corriente multiplicada por la de lazo de control del voltaje.....	54
Fig. 60 Diagrama de bode funciones de transferencia del sistema hibrido. ....	55
Fig. 61 Respuesta para el controlador del sistema HESS.....	55
Fig. 62 Control de gestión de energía para los conversores DC/DC Bidireccionales. ....	56
Fig. 63 control de los conversores DC/DC bidireccionales.....	57
Fig. 64 Curvas de voltaje DC, Potencia Fotovoltaica, Corriente de las baterías, Corriente de los supercapacitores,.....	58

Fig. 65 Curvas de voltaje DC, Corriente de la carga, Corriente de las baterías, Corriente de los supercapacitores.....	59
Fig. 66 Curva de voltaje de la Carga, Batería y Supercapacitor.....	60
Fig. 67 Curva de voltaje de la Carga, Batería y Supercapacitor.....	60
Fig. 68 Potencias de la Carga, Supercapacitor, Batería. ....	61
Fig. 69 Voltaje de la carga, generación tipo “Bell”, corriente del banco de baterías, corriente del banco de supercapacitores. ....	61
Fig. 70 Diseño del sistema en el software. ....	62
Fig. 71 Curvas de Voltaje, Corriente, Potencia .....	62

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1 Características de los paneles fotovoltaicos. ....	5
TABLA 1.2 Algoritmos MPPT. ....	6
TABLA 1.3 Características de las baterías. ....	11
TABLA 1.4 Supercapacitor con respecto a distintos tipos de almacenamiento. ....	14
TABLA 2.1 Parámetros eléctricos de las cargas en DC. ....	21
TABLA 2.2 Análisis del consumo eléctrico. ....	22
TABLA 2.3 Características del panel fotovoltaico ....	22
TABLA 2.4 Irradiación mensual. ....	23
TABLA 2.5 Parámetros de diseño del banco de baterías. ....	27
TABLA 2.6 Características de la batería. ....	27
TABLA 2.7 Características eléctricas del banco de supercapacitores. ....	29
TABLA 2.8 Características eléctricas del banco de supercapacitores. ....	29
TABLA 2.9 Parámetros para el diseño del convertidor DC/DC elevador. ....	30
TABLA 2.10 Parámetros del sistema para el diseño de convertidor DC/DC tipo C. ....	33
TABLA 2.11 Ciclo de trabajo. ....	33

## ABREVIACIONES Y TERMINOS

**SC.** Supercapacitor.

**Bat.** Batería.

**PV** Energía fotovoltaica.

**MPTT** Máximo punto de potencia total (Maximun Power Point Tracker).

**MPP** Punto de potencia máximo

**DC** Corriente Continua.

**AC** Corriente Alterna.

**HEES** Sistema de almacenamiento de energía híbrida.

**PWM** Modulación por ancho de pulso.

## RESUMEN

El presente trabajo plantea diseñar una instalación fotovoltaica con almacenamiento híbrido, basado en baterías y supercapacitores, con el propósito de mejorar la confiabilidad en las instalaciones fotovoltaicas.

Este proyecto está compuesto por tres capítulos. El primero realiza un estudio bibliográfico que contiene bases teóricas, definiciones que ayudan para el desarrollo de este proyecto, se detalla componentes para una instalación fotovoltaica y se menciona 3 topologías de sistemas fotovoltaicos.

En el segundo capítulo se escoge una de las topologías y se diseña un caso práctico con datos reales aproximados, en el cual comprende desde el diseño y modelamiento de la matriz fotovoltaica, convertidores y banco de baterías y supercapacitores.

En el tercer capítulo se ha diseñado un controlador de gestión de energía que permite observar y verificar el aporte de los supercapacitores, para mejorar el almacenamiento de baterías. Se muestra los resultados de la simulación y se evidencia que los supercapacitores complementan a las baterías, formando un sistema híbrido que aumenta la confiabilidad y eficiencia del sistema.

Finalmente, se determinan las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante el desarrollo del proyecto de investigación.

**Palabras clave:** Supercapacitores, Control de gestión de energía, Algoritmos MPPT, Convertidores DC/DC.

# ABSTRACT

This project presents a design of a photovoltaic system with storage system composed of batteries and supercapacitors, the aims to improve the reliability of photovoltaic systems.

This project is composed of three chapters. The former performs a literature containing theoretical basis, definitions help for the development of the project, detailed components for a photovoltaic installation and 3 topologies mentioned photovoltaic systems.

In the second chapter, the topology is chosen and a case of study whit approximate real data, which involves the design and model of the photovoltaic array, converters and battery bank and supercapacitors.

In the third chapter, an energy management controller is designed that allows observing and verifying the contribution of the supercapacitors, improving the storage system batteries. The simulation results validate, that the supercapacitors complement the batteries, forming a hybrid system that increases the reliability of the system.

**Keywords:** Supercapacitors, Power Management Control, MPPT Algorithms, DC / DC Converters

# Introducción

## A.1. Contextualización.

En los últimos años las fuentes de energía renovable se han convertido en una necesidad energética en los países en pleno desarrollo, la finalidad es aumentar el servicio de energía eléctrica y motivar al consumo de energía amigable con el ambiente (Recalde, Bouille, & Girardin, 2015). A nivel global la producción de energía eléctrica no renovable es una causa de contaminación afectando al cambio climático, la contaminación atmosférica el aumento de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) etc. Mientras que las fuentes renovables producen energía limpia (González, Domínguez, Ruiz, & Alonso, 2016).

Por otra parte, dentro de las principales fuentes de energía renovable que contribuyen en el desarrollo y crecimiento, se encuentra la energía fotovoltaica con una capacidad total de energía a nivel mundial de 400 GW (Power, 2018). En la actualidad el desarrollo de un sistema fotovoltaico se ve inmerso en el estudio y mejoramiento de su componentes eléctricos y electrónicos a medida que la tecnología avanza los costos de inversión son menores y los sistemas fotovoltaicos más grandes y con mejores características (Santillan, 2016).

El mejoramiento de una instalación fotovoltaica se puede dar en diversos elementos del sistema como: paneles fotovoltaicos, sistema de almacenamiento o en los circuitos electrónicos de potencia, para este caso de estudio se plantea el desarrollo de un sistema de almacenamiento híbrido basado en supercapacitores.

Un sistema de almacenamiento híbrido es la combinación de dos o más tipos de sistemas de almacenamiento de energía. Un ejemplo es el uso de batería y supercapacitores, la ventaja en este tipo es que se complementan entre sí, ya que los supercapacitores poseen alta densidad de potencia y las baterías una alta densidad de energía (Glenn, 2019) , las aplicaciones se pueden ver reflejadas en el aumento de eficiencia energética de una instalación fotovoltaica.

## A.2. Planteamiento del problema.

Los sistemas de almacenamiento actuales de instalaciones fotovoltaicas no tienen la capacidad ante una alta densidad de potencia, capacidad de trabajo en temperaturas extremas, ni tampoco una buena capacidad de carga y descarga, esto se debe a que los sistemas de almacenamiento trabajan con proceso químicos incapaces de tener estas características mencionadas. La persistente énfasis en la eficiencia y calidad energética de nuevos dispositivos de almacenamiento está incentivando a la utilización de supercapacitores, Mejorar un sistema fotovoltaico con supercapacitores es mejorar el almacenamiento de energía ya que, Las baterías tienen un ciclo de vida corto y sus reacciones químicas internas causan deterioro con el tiempo (Glenn, 2019).



Una gran limitante de una demanda de carga variable es el almacenamiento de la energía eléctrica por lo que un sistema con almacenamiento no puede ser suficiente para poder alimentar a una carga que demanda de potencia de alto consumo hoy en día las cargas requieren respuestas rápidas de potencia carga y descarga variable como es el caso de cocina de inducción, duchas eléctricas, calefón eléctrico. Motores etc.

Es así como se requiere sistemas fotovoltaicos con almacenamiento basado en supercapacitores capaces de alimentar cargas que requieren potencias altas o de demanda variable y al mismo tiempo contribuyendo con el ahorro de energía promoviendo hacia la eficiencia energética y utilización de energías renovables.

### **A.3. Formulación del problema.**

El presente trabajo de grado se enfocará en como diseñar un sistema de almacenamiento que considere el uso de supercapacitores para cargas variables en una instalación fotovoltaica. Utilizando un software específico para modelar y simular el diseño.

### **A.4. Justificación del trabajo.**

Los sistemas de almacenamiento se los utiliza en instalaciones fotovoltaicas autónomas su trabajo consiste en almacenar energía, en este proyecto a través de paneles fotovoltaicos, estos sistemas de almacenamiento deben suministrar un voltaje y corriente en forma óptima capaz que las cargas funcionen de mejor manera, para lo cual este proceso se lo perfecciona con supercapacitores que suministran una alta densidad de potencia y pueden mejorar la calidad de voltaje y corriente al proveer de energía eléctrica.

Para poder desarrollar el sistema de almacenamiento basado en supercapacitores es necesario estudiar topologías diferentes de control que permitan realizar un diseño. El uso de baterías con la colaboración de supercapacitores promete una mejor eficiencia, autonomía y viabilidad energética en el almacenamiento.

Hoy en día es de gran relevancia el uso de energías renovables para precautelar la contaminación y apoyar a la energía limpia pero sin perder los estándares de calidad se establecen leyes la cuales promueven a la utilización de energía renovables como se especifica la Ley Orgánica Del Servicio Público De Energía Eléctrica en sus consideraciones art.413 “La Constitución de la República del Ecuador establece que el Estado debe promover la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables”(Asamblea Nacional República del Ecuador, 2019).

Con estas observaciones y demostrando que existe un relación entre beneficio e innovación tecnológica se establecerá la topología de diseño de un sistema de almacenamiento basado en supercapacitores para una instalación , así como también simular

el diseño a través de un software específico considerando una carga de demanda variable y comprobando que funcione de manera adecuada y de este mismo modo aportando para la actualidad una nueva tecnología poco desarrollada en nuestro ambiente y dando una propuesta de diseño funcional para ser implementada ,El estudio del proyecto y realización del diseño se estima que tomara 7 a 8 meses, dependiendo de recursos técnicos que faciliten su avance.

#### **A.5. Alcance del trabajo.**

El presente trabajo se enfocará en diseñar un sistema de almacenamiento que use supercapacitores como almacenadores de energía para una instalación fotovoltaica que alimente una carga de demanda variable de hasta 1500 W. El cual comprende en realizar el estudio y el diseño y además se modelará y simulará en un software específico.

#### **A.6. Objetivo general.**

Diseñar un sistema de almacenamiento con supercapacitores para una instalación fotovoltaica que alimente una carga con demanda variable a través de un software específico y especializado cumpliendo las características necesarias para simular el diseño.

#### **A.7. Objetivos específicos.**

1. Realizar un estudio de los distintos tipos de almacenamiento de energía con enfoque en nuevas tecnologías como los supercapacitores para el caso de sistemas fotovoltaicos.
2. Realizar el diseño de almacenamiento considerando el uso de supercapacitores como parte del almacenamiento de energía.
3. Simular el diseño de almacenamiento con supercapacitores para un sistema fotovoltaico en un software especializado considerando cargas variables.

# **CAPÍTULO I**

## **Estudio Bibliográfico**

Este capítulo tiene como objetivo realizar un estudio de los distintos tipos de almacenamiento de energía con enfoque en nuevas tecnologías como los Supercapacitores para el caso de sistemas fotovoltaicos. Para conocer sobre los fundamentos de almacenamiento de los sistemas fotovoltaicos, este capítulo se divide en cuatro secciones. La primera describe los sistemas fotovoltaicos, la segunda los componentes de un sistema fotovoltaico, En la tercera parte, se habla de topologías de almacenamiento basadas en supercapacitores y finalmente se explica las cargas variables.

### **Introducción.**

La generación de energía eléctrica basada en energías renovables está tomando cada vez más importancia a nivel global, la integración de energías renovables a nuestro país aumenta progresivamente. En la actualidad la producción de energía renovable en el Ecuador es del 72.58% lo cual representa 21.224.31 gigavatios hora (GWh). Considerada una de las principales fuentes de energía renovable, la energía fotovoltaica tiene una capacidad total instalada de 0.13% lo cual representa 38.08 gigavatios hora (GWh) (ARCONEL, 2018).

La energía fotovoltaica tiene tres aplicaciones: residencial, comercial y de generación. Con respecto la capacidad total de energía fotovoltaica se tiene una capacidad instalada a nivel mundial de 400 GW (Power, 2018). Las instalaciones desarrolladas a nivel residencial tienen una capacidad no mayor a 1 kW. Mientras que para aplicaciones tipo comercial se comercial pueden alcanzar capacidades cercanas a 250 kW (Of & Photovoltaic, 2018). En el caso de generación, se puede llegar a una capacidad instalada de 1GW (IEA, 2019).

Un sistema fotovoltaico es un gran potencial de energía renovable a nivel global y esta es la principal razón para que en el Ecuador el desarrollo y la innovación en estos sistemas formen parte de la investigación y fomenten a la producción de energía limpia reduciendo la contaminación y el agotamiento de combustibles fósiles.

### **1.1. Sistemas fotovoltaicos.**

La tecnología utilizada para transformar la energía solar en energía eléctrica se llama fotovoltaica (PV), la palabra procede de foto que significa “luz” y voltaico “electricidad. (Majid Jamil, M Rizwan, 2018). Un sistema fotovoltaico es el conjunto de elementos eléctricos, electrónicos y mecánicos, entre ellos están los generadores de energía conocidos como paneles fotovoltaicos, sistemas de almacenamiento de energía, inversores DC/AC y convertidores DC/DC Figura1. Un sistema fotovoltaico finalmente suministra la energía de una forma independiente o vinculado con la red eléctrica (Kaushika, Mishra, & Rai, 2018).

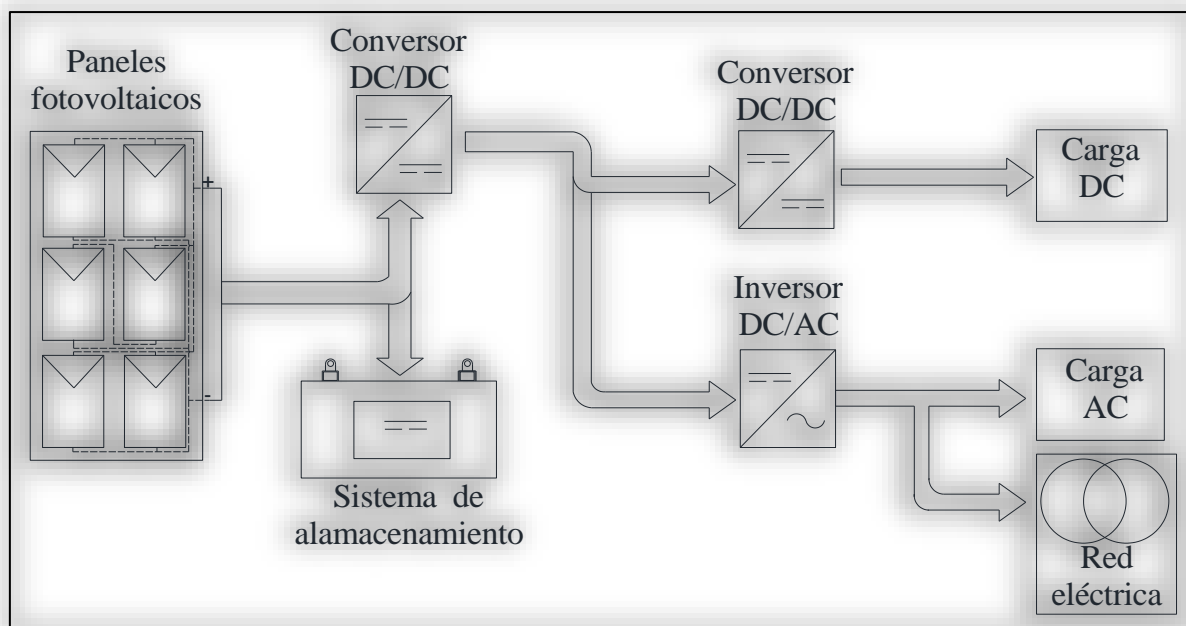


Fig. 1 Elementos básicos de un sistema fotovoltaico.

Fuente: (Autor 2020)

Los sistemas fotovoltaicos se clasifican en general como: Sistemas fotovoltaicos autónomos o aislados, sistemas fotovoltaicos conectados a la red. sistemas fotovoltaicos híbridos.

#### 1.1.1. Sistema fotovoltaico autónomo (SFA).

Los SFA producen energía eléctrica para cargas eléctricas no conectadas a la red. empleando un sistema de almacenamiento para períodos en los que la generación de los paneles fotovoltaicos es inferior al consumo (Oscar Perpíñan Lamigueiro, 2011). En el caso de aplicaciones residenciales, se utiliza paneles fotovoltaicos conectados a inversores y luego a la carga (Jarauta Rovira, 2010).

#### 1.1.2. Sistemas fotovoltaicos conectados a la red (SFCR).

Los SFCR cumplen la función de producir energía eléctrica para poder ser inyectada a la red convencional y la carga es alimentada por el sistema y a su vez por la red eléctrica. Los sistemas acoplados a la red reciben una compensación económica por la cantidad de energía aportada (Oscar Perpíñan Lamigueiro, 2011).

#### 1.1.3. Sistemas fotovoltaicos híbridos (SFH).

Los SFH son la combinación de un sistema fotovoltaico independiente y fuente de energía como generadores eólicos, generadores a diésel, generadores térmicos o de biomasa. De forma que ambas fuentes de energía se complementen y suministren energía a la carga (Kaushika et al., 2018).

## **1.2. Componentes de un sistema fotovoltaico.**

Los elementos que actúan en un sistema fotovoltaico dependen del tipo de instalación o tipo de sistema que se emplee, existen. Instalaciones residenciales, comerciales, industriales, y como los mencionados anteriormente, sistemas híbridos, sistemas con conexión a la red, sistemas autónomos sistemas con o sin almacenamiento (Adel A. Elbaset, 2017). En un sistema fotovoltaico existen tres elementos que son importantes los paneles fotovoltaicos, convertidores y sistemas de almacenamiento, se detalla cada uno de ellos a continuación.

### **1.2.1. Paneles Fotovoltaicos.**

Un panel fotovoltaico cumple la función de transformar la energía solar en energía eléctrica. Lo hace a través de células fotovoltaicas conectadas en serie o paralelo, suministrando un nivel de voltaje, corriente y potencia en función de la radiación solar, temperatura y orientación del panel fotovoltaico (Mateo, 2016).

#### **1.2.1.1. Células fotovoltaicas.**

Las células fotovoltaicas se fabrican utilizando distintos tipos de materiales semiconductores especialmente el silicio con una unión p-n, El funcionamiento de la célula fotovoltaica es absorber fotones de luz y emitir electrones (Majid Jamil, M Rizwan, 2018).

Las células fotovoltaicas producen niveles bajos de tensión, intensidad y potencia. Estas células fotovoltaicas se encuentran agrupadas en serie para incrementar su voltaje y en paralelo para incrementar la potencia (Oscar Perpiñan Lamigueiro, 2011). El voltaje de una célula fotovoltaica es de 0.6 Voltios si la irradiancia solar es de  $1000 \text{ W/m}^2$ . La corriente puede alcanzar 3 Amperios si el área de radiación solar  $100 \text{ cm}^2$ . y la potencia entre 1 a 2 Watios.(Messenger, 2018).

#### **1.2.1.2. Estructura de los paneles fotovoltaicos.**

Existen variedad de paneles fotovoltaicos tanto por sus propiedades físicas, químicas, eléctricas o por sus características de estética y estructurales. Un panel fotovoltaico se forma por células que son encapsuladas por una capa de EVA (Etileno, Vinilo y Acetato), una lámina de vidrio frontal y capa posterior de un polímero termoplástico. El conjunto tiene un marco en estructura de aluminio anodizado, aumentando la resistencia mecánica y permitiendo el anclaje a estructuras de soporte (Carmen, 2007). En la Figura 2. Se muestra las partes que conforman un panel fotovoltaico.

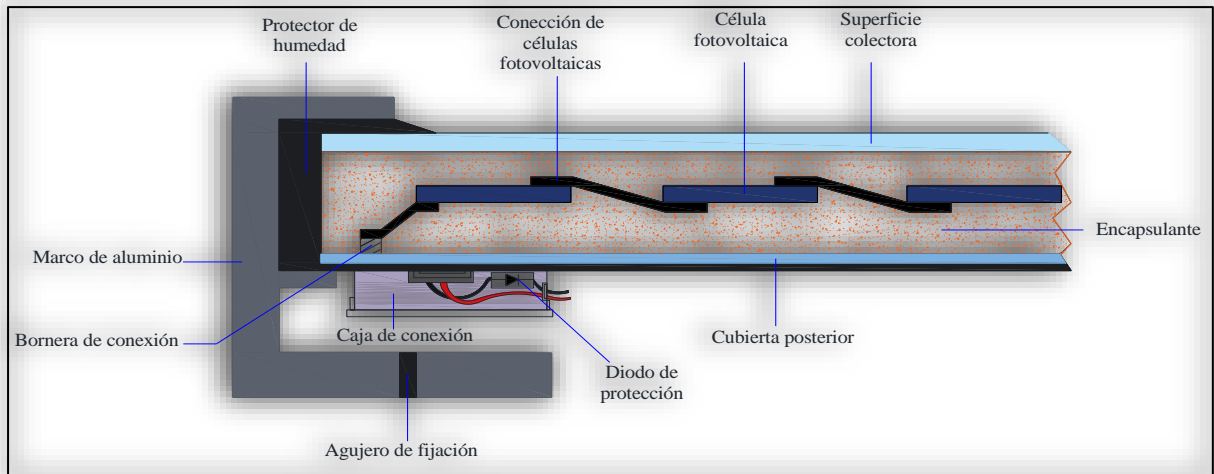


Fig. 2 Corte transversal de un panel fotovoltaico  
Fuente: (Carmen, 2007)

### 1.2.1.3. Conexión de paneles fotovoltaicos.

Los paneles fotovoltaicos se agrupan 2 o más y es necesario que tengan las mismas características y estén diseñados por los mismos fabricantes.

- a) **Conexión en paralelo.** Se conecta todos polos positivos de los paneles fotovoltaicos, y por otro lado todos los polos negativos como se muestra en la Figura 3a. La conexión en paralelo mantiene el voltaje y se suma la corriente de los paneles fotovoltaicos.
- b) **Conexión en serie.** Se conecta directamente los paneles fotovoltaicos entre si conectando un polo positivo del panel con el polo negativo del siguiente panel, como se muestra en la Figura 3b. En la conexión en serie se mantiene la corriente y se suma el voltaje.
- c) **Conexión mixta en serie y paralelo.** Se utiliza cuando se conectan 4 o más paneles fotovoltaicos, y los paneles fotovoltaicos van conectados tanto en serie como en paralelo Figura 3c. La conexión mixta aumenta tanto el voltaje como la corriente.

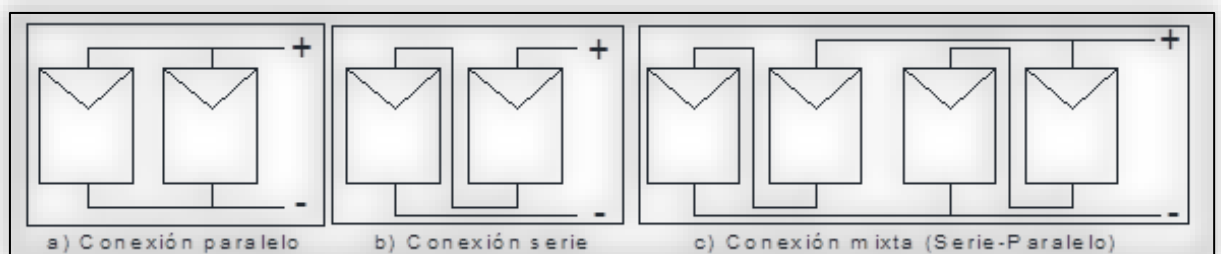


Fig. 3 Conexiones de paneles fotovoltaicos.  
Fuente: (Autor 2020).

#### 1.2.1.4. Tipos de paneles solares.

La clasificación de los paneles fotovoltaicos depende del tipo de células que están agrupadas, encapsuladas y montadas en el soporte de paneles. Los tipos principales de paneles fotovoltaicos son monocristalinos policristalinos amorfos. En la Tabla 1.1, se resume las principales características.

TABLA 1.1 Características de los paneles fotovoltaicos.

	Rendimiento.	Potencia.	Costo.	Tamaño.	Número de células.	Peso.	Voltaje Max.	corriente Max.	Temperatura de funcionamiento.	Temperatura operacional de la célula.	vida útil.
	(%).	(Wp).	(\$)	(mm).	#	(Kg)	(V)	(A)	(°C).	(°C).	(Años).
<b>Paneles fotovoltaicos Monocristalinos.</b>	15-19	140-400	320	1580×1002×46	96	24	34-55	4-6	-40 / 85	45±2	25-30
<b>Paneles fotovoltaicos Policristalinos.</b>	15-16	184-265	140	1650×992×40	60	19	29-30	7-8	45	45±2	20-25
<b>Paneles fotovoltaicos Amorfos.</b>	<10	60-140	145	5392×378×15	60	13	24-40	5	45	40±2	15-20
<b>Paneles fotovoltaicos Mono y Policristalinos.</b>	24-16.5	210	350	1480×985×15	54	18.5	27	8	45	43±2	25-30

Fuente: Autor,2020.

Existen otros tipos de paneles fotovoltaicos formados por combinaciones de materiales como son: Paneles solares de arsénico de galio que tienen un rendimiento de 27 a 28 % pero sus materiales son escasos. Paneles solares de Diseleniuro de cobre alcanzan una eficiencia del 17% en laboratorio y en paneles comerciales 9%. Paneles solares de telurio de cadmio su eficiencia es del 16% y en paneles comerciales 8% y Paneles solares híbridos. Los cuales son combinación con panel solar térmico y panel solar fotovoltaico (Tobajas Vázquez, 2018).

#### 1.2.2. Técnicas de seguimiento de punto de máxima potencia.

Maximum Power Point Tracker (MPPT), o seguimiento de punto máximo de potencia tiene la finalidad de sacar el máximo rendimiento en potencia del sistema, mediante algoritmos de control, los paneles fotovoltaicos no son fuentes eléctricas fijas y las características de  $I - V$  no son lineales, mediante un conversor DC/DC elevador, que se controla variando el ciclo de trabajo con un algoritmo MPPT se obliga al panel fotovoltaico a extraer el MPP. (Hameed, Saleh, Sawadi, Al-Yasir, & Abd-Alhameed, 2019).

Entre los algoritmos para obtener MPPT se encuentran, Conductancia incremental (CI), algoritmo Hill Climb (HC), algoritmo basado en lógica difusa, Algoritmo basado en redes neuronales y el algoritmo de perturbar y observar (P&O).

TABLA 1.2 Algoritmos MPPT.

	Proceso	Entradas	Costo
<b>Conductancia incremental</b>	Se basa en la derivada de la ecuación de la potencia con respecto al voltaje. $\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0$ Se caracteriza por tener una respuesta rápida en lazo cerrado y una simple implementación digital.	Voltaje y corriente de panel fotovoltaico	Medio
<b>Hill Climb</b>	Se deriva del P&O y presenta las mismas ventajas y desventajas, en lugar de una perturbación en el voltaje se modifica la señal de control del dispositivo semi-controlado.	Voltaje y corriente del panel fotovoltaico.	Bajo
<b>Lógica difusa</b>	No requiere modelo matemático del sistema pero si un amplio conocimiento del funcionamiento del sistema, similar al Hill Climb y P&O Respuesta con menos fluctuaciones en estado estable dinámica rápida sin fluctuaciones ante variaciones bruscas de radiación solar y temperatura	Tiene 2 entradas, el error de la derivada de la potencia respecto al voltaje del instante actual en relación con el momento anterior, y la otra entrada es la variación del error.	Medio
<b>Redes neuronales</b>	Es un proceso matemático complejo, Tiene una respuesta dinámica más rápida y con menos fluctuaciones	Radiación Solar y temperatura ambiental	Alto
<b>Perturbar y observar</b>	Modifica el voltaje al mismo tiempo que supervisa la potencia trabaja variando el ciclo de trabajo, su respuesta ante variaciones de radiación solar brusca no es rápida pero es de gran facilidad para implementar.	Voltaje y corriente del panel fotovoltaico	Bajo

Fuente: (Autor, 2020).

### 1.2.3. Conversores.

Principalmente existen 2 clases de conversores denominados, conversor (DC/DC) e inversores (DC/AC), encargados de modificar los parámetros de una señal eléctrica y acondicionarla a un tipo de señal diferente. Los inversores son utilizados para cargas de corriente alterna o a su vez el enlace directo hacia la red. Los conversores (DC/DC) para cargas de corriente directa y mejorar el punto de máxima potencia (MPP) de un sistema fotovoltaico (Guerrero Pérez, 2017).

#### 1.2.3.1. Conversores DC/DC.

Los conversores DC/DC son dispositivos electrónicos o electromecánicos que transforman una fuente de corriente continua de un nivel de voltaje normalmente no regulado a un nivel de voltaje controlado y deseable. Esta transformación de voltaje puede ser de un nivel de voltaje más alto a un nivel de voltaje más bajo o viceversa (Majid Jamil, M Rizwan, 2018). Un conversor también convierte una potencia de entrada en una potencia de salida con el mayor rendimiento posible (Abella, 2005).

Los convertidores internamente están compuestos por semiconductores, que actúan como interruptores que se cierran y se abren, y de acuerdo con una señal de control transforman un nivel de voltaje determinado en otro nivel de voltaje diferente. Los conversores son ampliamente utilizados para convertir voltajes en sistemas de almacenamiento, sistemas fotovoltaicos, en redes de corriente continua etc. (Mohan, Undeland, & Robbins, 2009).

En la actualidad existen diferentes configuraciones de los conversores los cuales cumplen la misma función de regular la relación de voltaje de entrada con respecto al de salida. En



sistemas fotovoltaicos los conversores con que más se utilizan son los elevadores, reductores y para el control del almacenamiento bidireccionales o de primero o segundo cuadrante.

#### a) Conversor DC/DC reductor.

En un conversor reductor, el voltaje de salida es menor con respecto al voltaje de entrada, en el circuito de la Figura 4. se presenta los diagramas de funcionamiento. En el primer modo,  $t = 0$ , cuando el transistor ( $T$ ) esta conduciendo la corriente aumenta y pasa por el inductor ( $L$ ), el capacitor ( $C$ ), y la carga ( $R$ ). En el modo 2 cuando el transistor ( $T$ ) se apaga,  $t = t_1$ , el diodo de marcha libre ( $D_m$ ) conduce la energía que se almacena en el inductor ( $L$ ), y la corriente de ( $L$ ) sigue pasando por ( $L$ ), ( $C$ ), ( $R$ ) y ( $D_m$ ). La corriente de ( $L$ ) disminuye hasta ( $T$ ) se enciende nuevamente, se considera un ( $C$ ) a la salida para que el voltaje sea constante (Rashid, 2015).

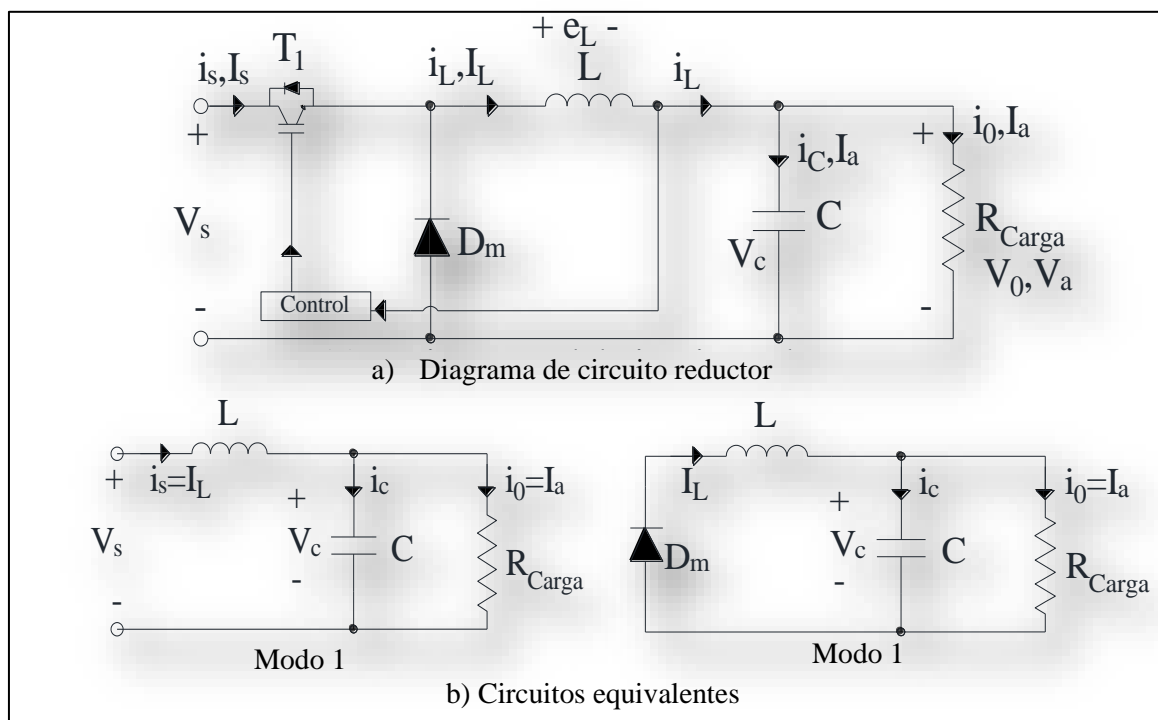


Fig. 4 Conversor DC/DC reductor. a) Diagrama del circuito, b) Circuitos equivalentes.  
Fuente:(Rashid, 2015).

#### b) Conversor DC/DC elevador.

En un conversor elevador, el voltaje de salida es mayor con respecto al voltaje de entrada. En el circuito de la Figura. 5. se tiene dos modos de funcionamiento. El primer modo,  $t = 0$ , si el transistor ( $T$ ) está conduciendo hace que la corriente que circula aumente y pasa por el inductor ( $L$ ) y el transistor ( $T$ ). El modo 2 cuando el transistor ( $T$ ) se apaga,  $t = t_1$ , la corriente pasa por el inductor ( $L$ ), capacitor ( $C$ ), diodo ( $D$ ) y la carga ( $R$ ), la corriente disminuye y se enciende nuevamente el transistor ( $T$ ). Hay que tener en cuenta que el conversor siempre

transfiere potencia a la carga y que el filtro de salida es muy alto por lo que se asume que el voltaje a la salida es contante (Rashid, 2015).

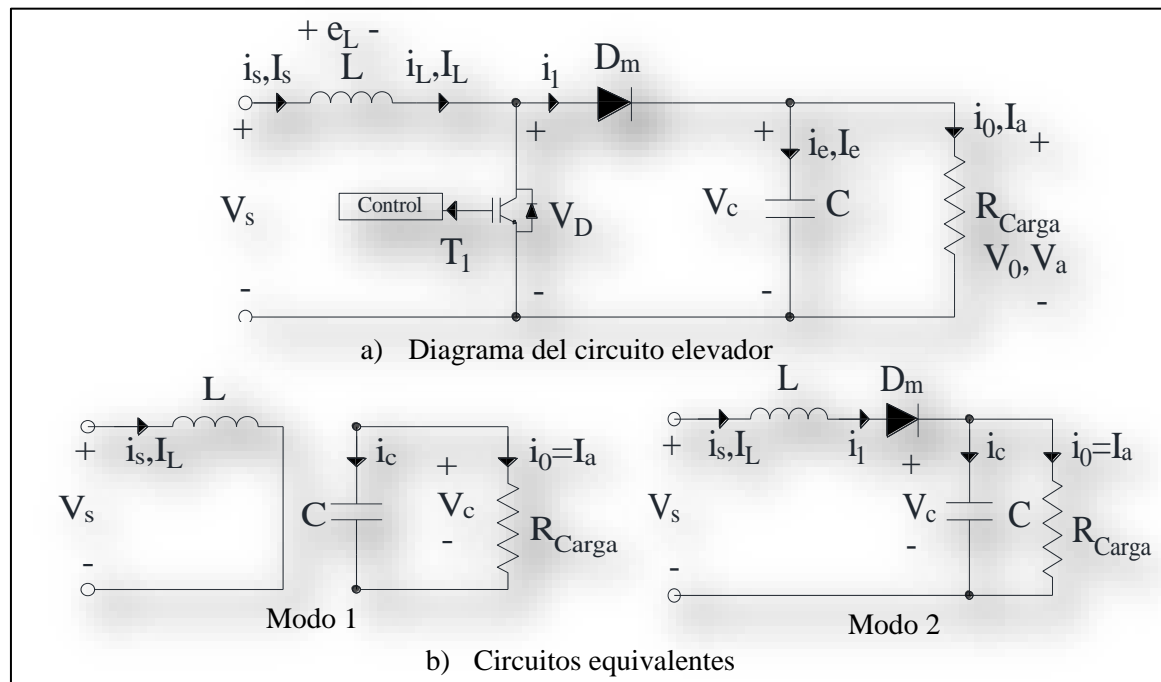


Fig. 5 Conversor DC/DC elevador. a) Diagrama del circuito, b) Circuitos equivalentes c) Formas de onda.  
Fuente:(Rashid, 2015).

### c) Conversor DC/DC tipo C (Bidireccional).

En este tipo de conversor también conocido como de primero y segundo cuadrante, la corriente en la carga puede ser positiva o negativa como se observa en la Figura 6(a), Cuando el conversor funciona en el primer cuadrante el voltaje en la carga y la corriente son ambas positivas, Cuando lo hace en el segundo cuadrante la tensión de carga es positiva y la corriente negativa, en la Figura 6(a). Se muestra el esquema del conversor tipo C, su modo de trabajo en la gráfica de voltaje y corriente.

El conversor DC/DC tipo C tiene modos de operación como conversor elevador cuando la energía fluye del sistema de almacenamiento hacia el bus DC, Figura 6(c). es decir  $S_2$  y  $D_1$  están activos y  $S_1$  y  $D_2$  están inactivos. Y se comporta como un conversor reductor Figura 6(b) cuando la energía fluye de bus DC hacia el sistema de almacenamiento  $S_1$  y  $D_2$  están activos y  $S_2$  y  $D_1$  están inactivos. En caso de que los dos interruptores se cierran al mismo tiempo la fuente ( $V_s$ ) entra en cortocircuito (Rashid, 2015).

La bidireccionalidad de este convertidor permite tener un mejor control en los sistemas de almacenamiento de energía híbrida ya que ciertos momentos los sistemas nos solo van a entregar energía, sino que también necesitan recibir.

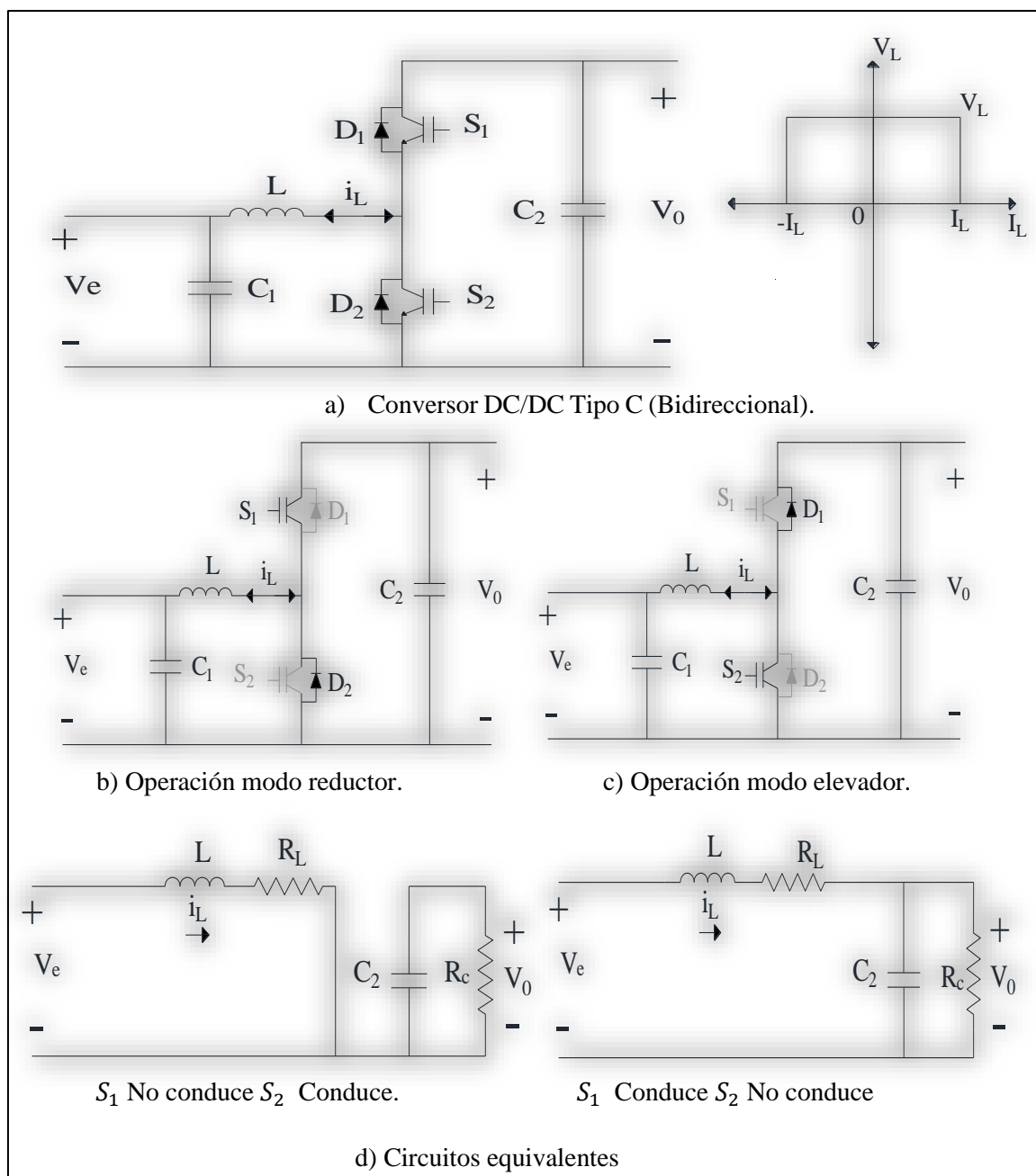


Fig. 6 Conversor DC/DC tipo C  
Fuente: (Pirooz & Noroozian, 2016)

### 1.2.3.2. Conversor DC/AC (Inversores).

Los inversores son circuitos de potencia que permiten convertir la corriente directa en corriente alterna (L. Ávila et al., 2018). En un sistema fotovoltaico un inversor es un dispositivo que convierte la salida de voltaje de corriente directa proporcionada por los paneles fotovoltaicos o sistema de almacenamiento, en corriente alterna que se pueda utilizar para suministrar a las cargas o exportar a la red (Majid Jamil, M Rizwan, 2018).

## Tipos de inversores.

Los inversores se pueden clasificar por, Figura 7. Su topología de construcción, su señal de entrada, por su señal de salida, por su etapa de potencia etc. Cualquiera que sea su tipo, los inversores tienen que cumplir los siguientes requisitos: Voltaje eficaz, frecuencia, distorsión armónica de la onda de corriente y voltaje, eficiencia, rendimiento y seguridad eléctrica etc. (Oscar Perpíñan Lamigueiro, 2011).

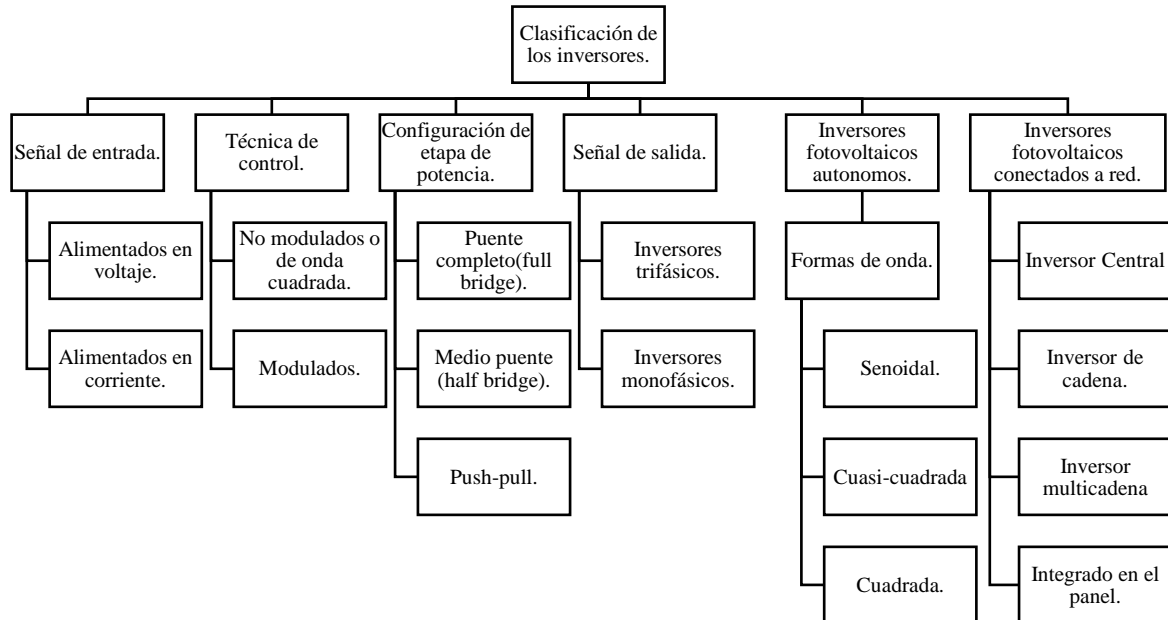


Fig. 7 Clasificación de los convertidores DC/AC  
Fuente: Autor.

Un inversor se lo debe elegir de acuerdo con la aplicación, necesidad y características de los equipos o sistema para los cuales se va a suministrar la corriente alterna. En una instalación fotovoltaica, los inversores pueden ser autónomos destinados a controlar el voltaje y frecuencia, e inversores conectados a la red, destinados a alimentar y sincronizarse con el suministro de la red, estos se diferencian de acuerdo con los algoritmos de control que se implementan con microcontroladores. (Kaushika et al., 2018).

### 1.2.4. Sistemas de almacenamiento.

La energía en una fuente renovable es generada de una manera intermitente, debido a este comportamiento son necesarios los sistemas de almacenamiento. El objetivo de un sistema de almacenamiento es absorber la energía desde la fuente renovable y almacenarla de tal forma que si la fuente ya no genera energía el sistema continúe suministrando energía y otra de las funciones es amortiguar las oscilaciones y cambios de potencia que se presentan las fuentes de energía (Tobajas Vázquez, 2018).

En un sistema fotovoltaico los principales propósitos en el sistema de almacenamiento que se requiere son los siguientes:

- Aumentar la fiabilidad de los sistemas fotovoltaicos.
- Suministrar los picos de potencia en la demanda diaria.
- Reducir las posibilidades de corte de suministro.
- Aumentar la disponibilidad de fuentes renovables. (energía solar, eólica).

#### 1.2.4.1. Almacenamiento con baterías.

Las baterías consisten en dispositivos acumuladores de energía eléctrica mediante procedimientos electroquímicos. Células convierten energía química en eléctrica mediante la técnica de reducción y oxidación, una combinación de una o más células conectadas en serie forman una batería (Majid Jamil, M Rizwan, 2018).

Las baterías utilizan solo corriente continua. Los valores de tensión que normalmente trabajan son de 2V, 12V, y 24V dependiendo de la cantidad de celdas. Por lo general una celda genera entre 2 a 3.3 voltios. La capacidad que puede tener una batería promedio de corriente de 200-4000Ah. La vida promedio de una batería es de 5 a 15 años según sea su tecnología (Burdick & Philip, 2017).

Una batería no podrá funcionar sin que se le haya suministrado energía previamente. El proceso al cual está sometida la batería se le denomina carga o recarga y este proceso puede repetirse por un determinado número de veces, dado por la vida útil del dispositivo (Rufer, 2017).

#### Tipos de baterías.

Existen diversos tipos de baterías con distintas características, baterías de plomo, baterías alcalinas de manganeso, níquel-cadmio, níquel-hidruro metálico, de iones litio, etc. En la Tabla 1.2 se distinguen características comparativas entre distintos tipos de baterías más utilizadas para sistemas fotovoltaicos.

TABLA 1.3 Características de las baterías.

Especificaciones	Baterías			Baterías con tecnología ion-Litio		
	Plomo-Acido	Níquel-Cadmio (NiCd)	Níquel-Metal Hidruro (Ni – MH).	Cobalto (Co).	Manganeso (Mn).	fosfato (PO43-).
Densidad de energía específica (Wh/Kg).	30-50	45-80	60-120	150-190	100-135	90-120
Resistencia interna (mΩ/V).	<8.3	17-33	33-50	21-42	6.6-20	7.6-15
Ciclos de vida	200-330	1000	300-500	500-100	500-1000	1000-2000
Tiempo de carga rápida (h).	8-16.	<1	2-4	2-4	<1	<1
Tolerancia de sobrecarga	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Autodescarga / mes	5%-15%	20%	30%	5%	5%	5%
Voltaje de celda	2.0	1.2	1.2	3.6	3.8	3.3
Corriente de carga máxima	5	20	5	>3	<30	<30
Temperatura de carga	-20 a 50°C	0-45°C	0-45°C	0-45°C	0-45°C	0-45°C
Temperatura de descarga	-20 a 50°C	-20 a 65°C	-20 a 65°C	-20 a 65°C	-20 a 65°C	-20 a 65°C
Mantenimiento requerido	3-6 Meses	30-60 Días	60-90 Días	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Requisitos de seguridad	Térmicamente estable	Térmicamente estable	Fusibles comunes	Circuito de protección obligatorio		

<b>Durabilidad de tiempo</b>	>5	>5	>5	>10	>10	>10
<b>En uso desde</b>	1881	1950	1990	1991	1996	1999
<b>Toxicidad</b>	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo

Fuente: (Autor, 2020).

Las baterías poseen una gran densidad de energía frente a otro tipo de almacenamiento, pero tiene restricciones como la baja velocidad de carga y descarga permitida. Una batería no es capaz de absorber grandes puntas de potencia en las cargas ni proporcionarlas en las descargas, sin que ello afecte negativamente en su vida útil (Tocora & Martínez, 2018).

#### 1.2.4.2. Almacenamiento con Supercapacitores.

Un supercapacitor es un dispositivo que presentan características de capacitores y baterías, Está formado por láminas de carbono activado, un electrolito especial y un separador. Trabaja por medio de una reacción electrolítica. La interfaz electrodo-electrolito positiva y la otra en la interfaz electrodo-electrolito negativa. Tal como se muestra en la Figura. 8.

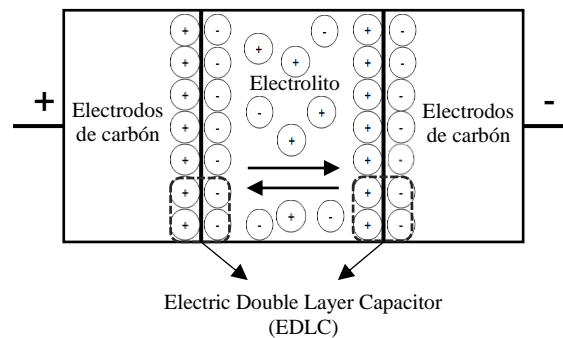


Fig. 8 Supercapacitor de doble capa.  
Fuente:(Barker, 2002)

Las características de un supercapacitor le permite tener una capacidad aproximada de 5000 F, y maneja voltajes limitados de 2.5-2.8 V (Rufer, 2017). Un supercapacitor se destaca por una densidad potencia alta y una densidad de energía baja su ciclo de vida útil es mayor a 10 años y tiene alrededor de un 95% de eficiencia (P. Ávila, 2017).

Los supercapacitores se pueden clasificar en tres grupos dependiendo del tipo de almacenamiento que utilicen y del material para construcción de los electrodos principalmente son tres tipos de materiales óxidos de metales de transición, polímeros conductores y materiales de carbono activados (Tocora & Martínez, 2018).

- Capacitores eléctricos de doble capa (ELDCs).
- Pseudocapacitores (PsCs).
- Capacitores híbridos (HCs).

#### **1.2.4.2.1. Ventajas y desventajas de los supercapacitores.**

##### **a) Ventajas.**

La ventaja de este tipo de almacenamiento frente a un almacenamiento convencional basado únicamente en baterías es que los supercapacitores absorben los picos de potencia amortiguando las oscilaciones de potencia generada prolongando la vida de las baterías que no están diseñadas para soportar de manera continuada ciclos de carga y de descarga. Estas oscilaciones de potencia son típicas de las energías renovables, en especial de la energía fotovoltaica (Mera, 2009).

- Los supercapacitores son cargados y descargados en pequeños periodos de tiempo, lo cual los hace apropiados para responder ante picos de potencia o ante interrupciones de poca duración.
- Su ciclo de vida es elevado, y tienen una densidad de potencia relativamente alta.
- Un supercapacitor pueden soportar corrientes de carga altas, cosa que daña a las baterías.
- no necesitan mantenimiento y trabajan en condiciones de temperatura muy adversas
- Alta potencia de salida.
- Eficiencia energética de 95 a 98% con respecto al 70 y 80% de las baterías.
- La tasa de carga y descarga es elevada.
- Su electrolito no es corrosivo y sus materiales no son tóxicos.
- Evita la descarga profunda y aumenta su vida útil de la batería.

##### **b) Desventajas.**

La cantidad de densidad de energía es relativamente baja

- El voltaje del supercapacitor es disminuye cuando se descarga.
- El almacenamiento de energía efectivo requiere un sistema de control electrónico.
- Debido a que la resistencia es muy baja se somete a descargas sumamente rápidas.
- Su densidad de energía es baja con respecto a la de las baterías.

#### **1.2.3.2. Comparación entre baterías y supercapacitores.**

Un supercapacitor con respecto a otros dispositivos de almacenamiento tiene las siguientes características se muestran en la Tabla 1.3.

TABLA 1.4  
Supercapacitor con respecto a distintos tipos de almacenamiento.

Sistema.	Densidad de energía.	Densidad de potencia.	Tiempo de vida.	Eficiencia.	Tiempo de carga.	Tasa de Autodescarga por día.	Rango de operación en temperatura	Ciclos de vida útil.	Voltaje por celda
	(kWh/kg)	(kW/kg)	(Años)	(%)	--	%	°C	--	v
<b>Supercapacitor</b>	20	100,00	10-20	85-98	1-10 s	20-40	-40-65	50000	2.3-2.85
<b>Plomo-Ácido.</b>	30-50	75-300	3-12	65-80	Ms	0.1-0.3	-5 a 40	500-4500	2.10-2.13
<b>Li-Ion.</b>	75-200	150-315	5-15	90-97	10-60Ms	0.1-0.3	-30 a 60	1000-45000	3.6-3.9
<b>Flywheels.</b>	10-30	400-1500	20-30	90-95	Ms-s	100	--	--	--
<b>NaS</b>	150-250	--	5-20	68-90	S	10-20	270 a 350	25000-45000	3-3.6

Fuente: (Autor 2020).

Se muestra que las baterías tienen una alta densidad de energía, pero moderada densidad de potencia a diferencia de un Supercapacitor que tiene una alta densidad de potencia, pero baja densidad de energía. La diferencia de supercapacitores con las baterías en el llamado Diagrama de Rangone Figura 9. En el cual se muestra la densidad de energía<sup>1</sup> como función de la densidad de potencia<sup>2</sup> (Fernández, 2015).

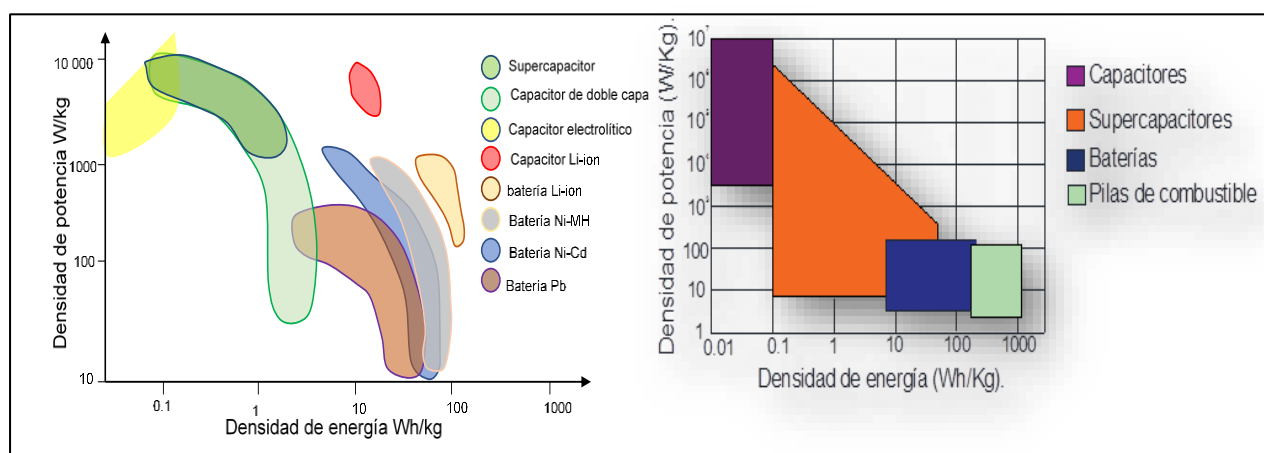


Fig. 9 Diagrama de Rangone: Densidad de potencia vs Densidad de Energía.  
Fuente: (Sánchez-Migallón, 2016). (Fernández, 2015).

### 1.2.3.3. Almacenamiento híbrido batería y supercapacitores.

El sistema de almacenamiento híbrido consta de dos o más tecnologías de almacenamiento un ejemplo es el uso de baterías y supercapacitores. Los supercapacitores y baterías se pueden considerar en muchas aplicaciones como sistemas complementarios donde la batería aporta energía mientras el supercondensador aporta los picos de potencia (Miller, 2011).

<sup>1</sup> Densidad de energía es la energía másica o densidad de energía volúmica, por ejemplo, entre mayor sea la densidad de energía del sistema mayor va a ser la energía que se pueda almacenar.

<sup>2</sup> Densidad de potencia es la potencia por unidad de peso del sistema de almacenamiento.



Los supercondensadores han surgido como una alternativa o complemento importante para las baterías en la Figura 10, se aprecia que las características que tienen los supercapacitores son esenciales para las baterías.

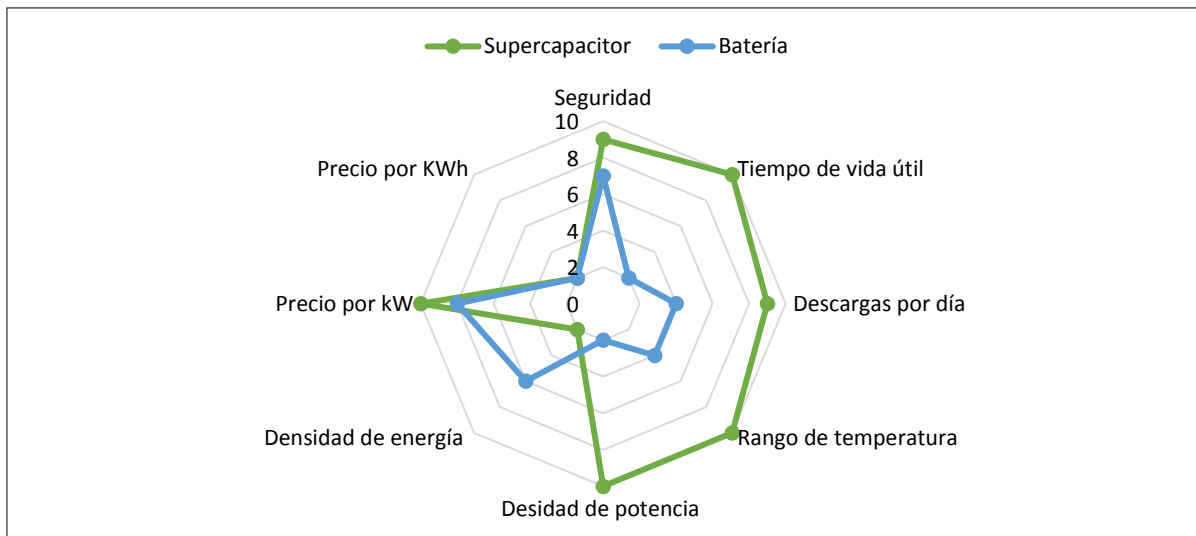


Fig. 10. Baterías y supercapacitores.  
Fuente: (Khalid, 2019).

### 1.3. Topologías de sistemas de almacenamiento en instalaciones fotovoltaicas.

En esta sección se analiza tres posibles topologías que consideran sistemas de almacenamiento en instalaciones fotovoltaicas.

#### 1.3.1. Topología 1.

##### Sistemas fotovoltaicos con sistema de almacenamiento híbrido y conectados a la red.

Un sistema fotovoltaico híbrido conectado a la red permite gestionar la energía en corriente continua, como en corriente alterna. La topología busca establecer un abastecimiento continuo donde actúa el sistema híbrido de almacenamiento y la fuente de energía en este caso los paneles fotovoltaicos, los convertidores (DC/DC) y un inversor que es el elemento que sincroniza con la red eléctrica en la Figura 11, se observa el esquemático de un sistema fotovoltaico híbrido conectado a la red.

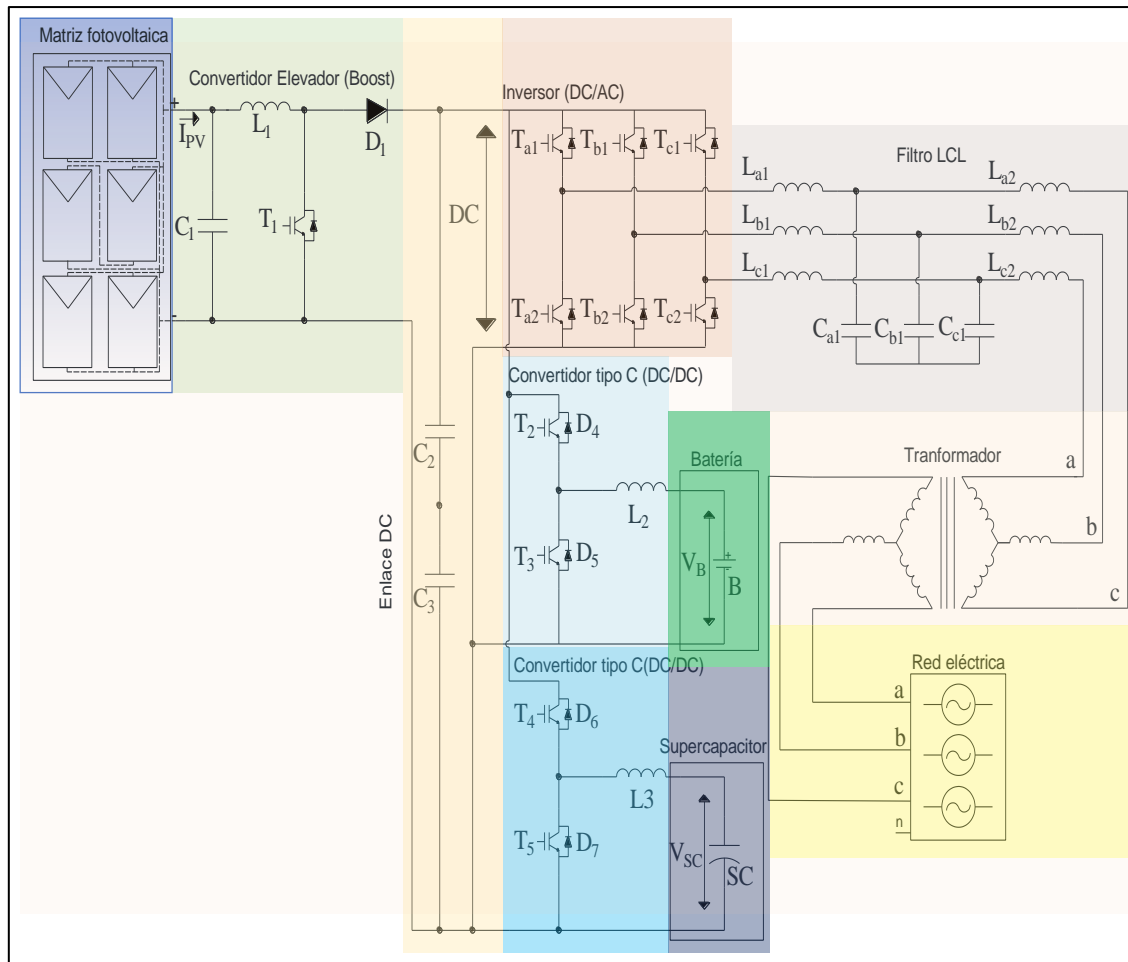


Fig. 11 Sistema fotovoltaico con almacenamiento híbrido y conectado a la red.  
Fuente: (Miñambres-Marcos, Guerrero-Martínez, Barrero-González, & Milanés-Montero, 2017).

### 1.3.2. Topología 2.

#### Sistemas fotovoltaicos autónomos con sistema de almacenamiento híbrido.

Esta topología está diseñada para trabajar con el almacenamiento híbrido basado en supercapacitores y baterías acoplados a un sistema autónomo. El sistema está conformado de una matriz fotovoltaica conectada a un conversor DC/DC elevador, la cual proporciona energía al conversor que se controla mediante el seguimiento de máximo punto de potencia (MPP).

Un sistema de almacenamiento de energía híbrido y es la integración de supercapacitores y baterías de iones de litio (Li-ion) acoplados a convertidores DC/DC tipo C que comparten el enlace DC con la matriz fotovoltaica y el conversor DC/DC elevador, para la alimentación de cargas en corriente continua (DC). Figura12(a). El sistema fotovoltaico es capaz de alimentar una carga en corriente alterna con la ayuda de un inversor en puente completo, Fig. 12 (b).

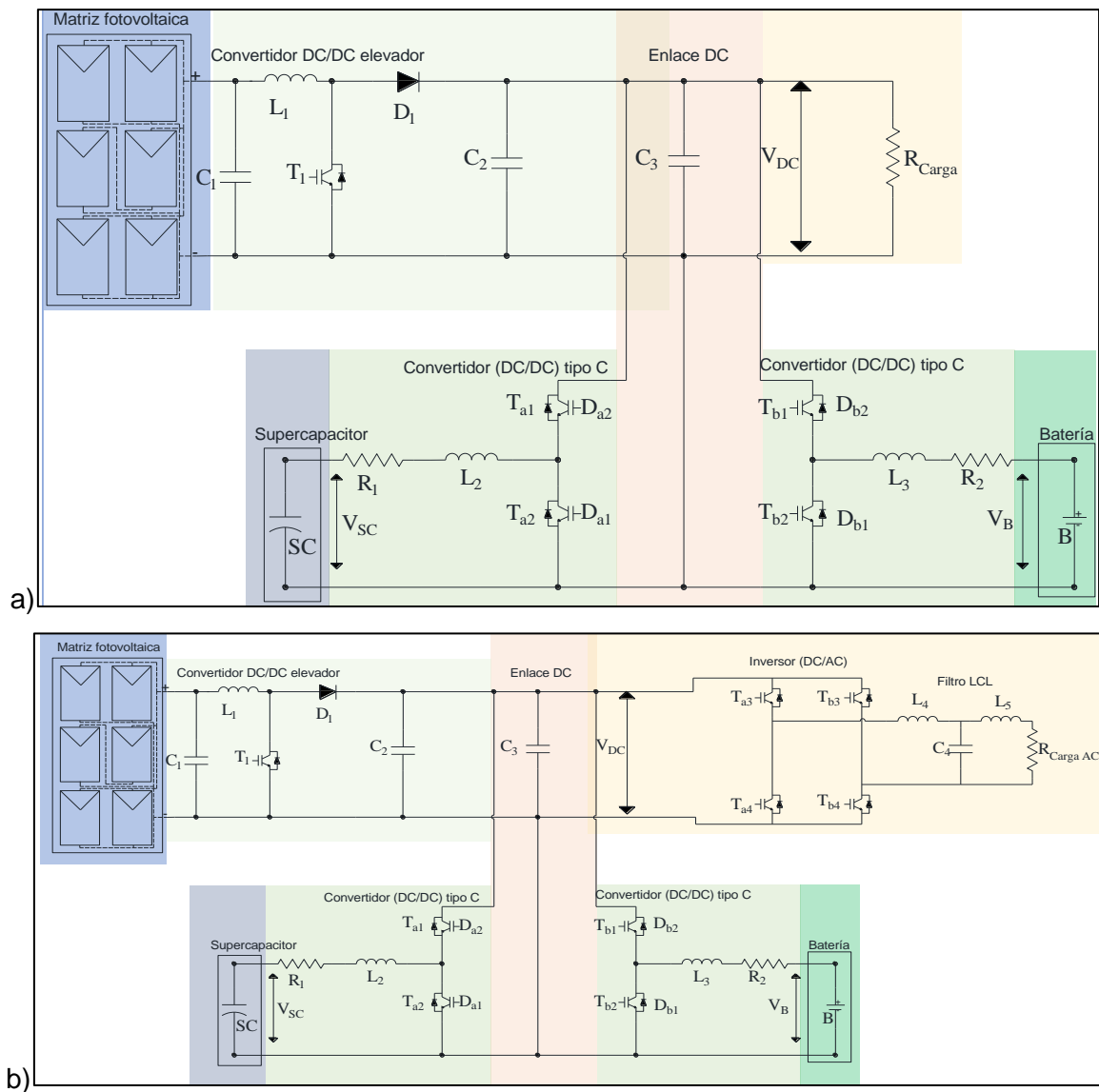


Fig. 12 SFA con almacenamiento híbrido a) Sistema para cargas DC, b) Sistema para cargas AC.  
Fuente: (Cabrane, Ouassaid, & Maaroufi, 2016).

### 1.3.3. Topología 3.

#### Sistemas fotovoltaico autónomo con almacenamiento híbrido (Supercapacitor-baterías de (Plomo-Acido) y (Iones de Litio (Li-ion))).

El sistema de almacenamiento híbrido de la topología que se muestra en la Figura 13. consiste en dos diferentes tipos de batería, que complementan al funcionamiento juntamente con el supercapacitor. Los sistemas de almacenamiento esta dispuestos en conexión paralelo y se enlazan a la salida de conversor elevador y la carga.

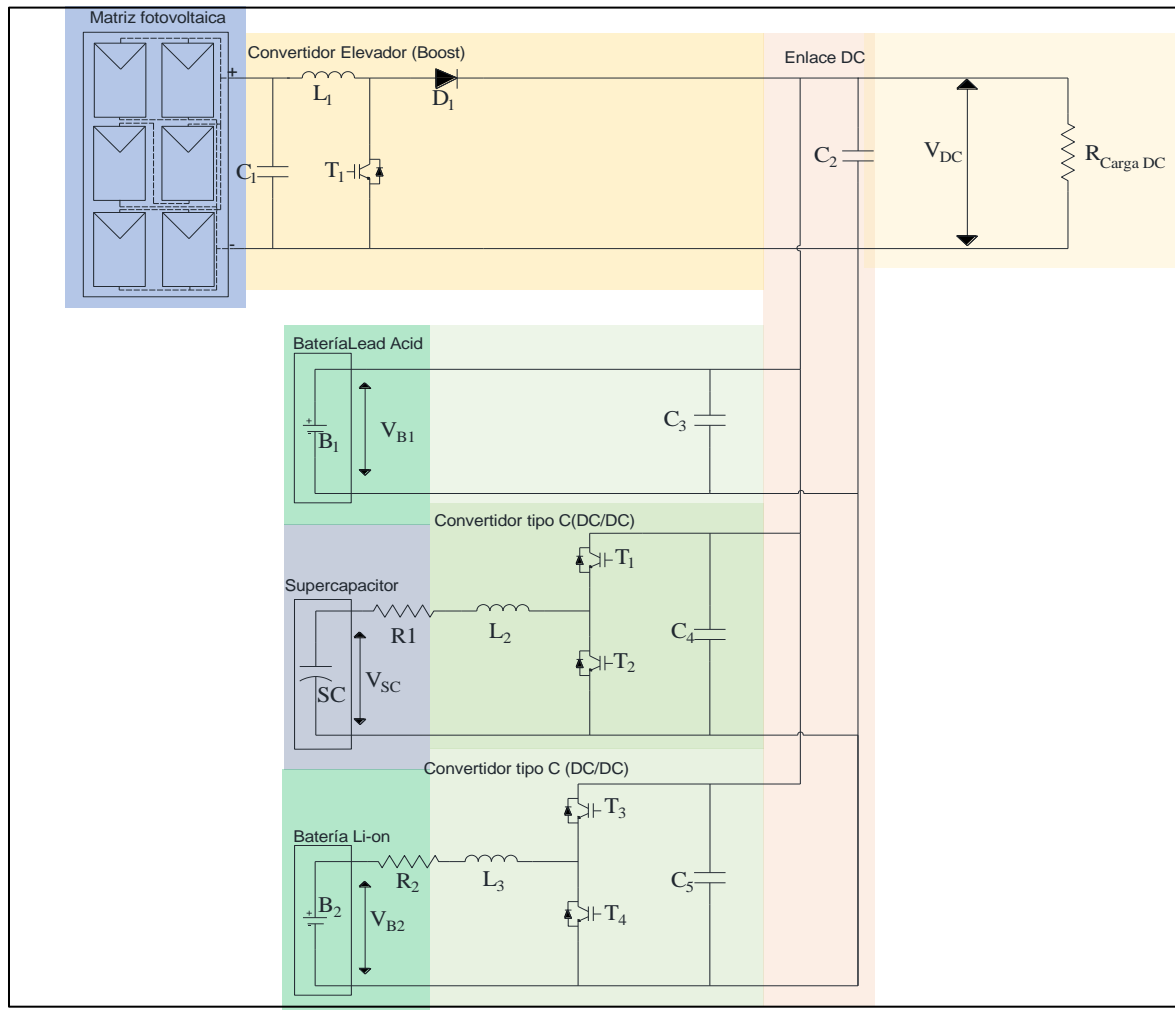


Fig. 13 Sistema fotovoltaico autónomo con tres distintos tipos de almacenamiento.  
Fuente: (Jing, Lai, Wong, & Wong, 2018).

#### 1.4. Cargas variables.

Los dispositivos eléctricos necesitan alimentarse de energía procedente de cualquier tipo de fuente, se alimentan de carga eléctrica que es una magnitud física característica de los fenómenos eléctricos, para que funcionen de manera adecuada y para que esto sea posible requieren de parámetros eléctricos como intensidad, tensión y potencia.

Los equipos eléctricos de acuerdo con su función pueden necesitar más intensidad, potencia por lo que es necesario que la fuente de energía supla de lo que la carga necesite, sin dañar los componentes. Las fuentes de energía deben brindar la cantidad de energía exacta que requiere la carga para lo cual necesitan conversores y reguladores de carga etc.

Un equipo en general no puede trabajar constantemente, por lo que también trabaja en función del tiempo, y el sistema de fuente que proporciona energía debe acoplarse a estos tiempos de conexión y de desconexión ya que ciertos equipos demandan más corriente al momento de arrancar o menos potencia en estado de reposo. En la Figura 14 se muestra la curva característica de una carga variable en términos de potencia y corriente.

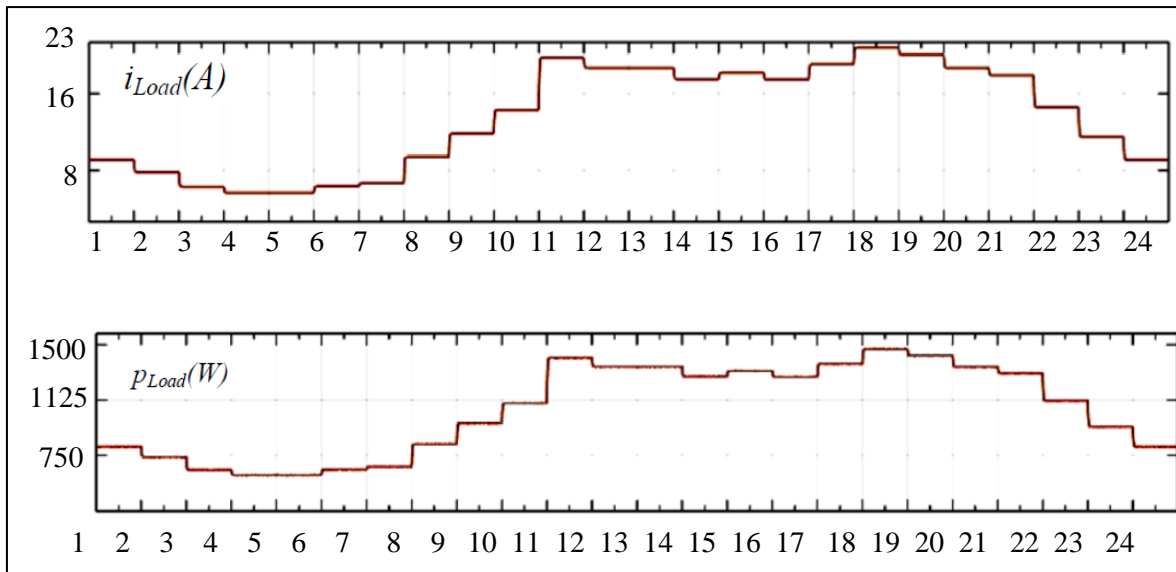


Fig. 14 Ejemplo de carga variable  
fuente:(Jamshidpour & Saadate, 2016)

#### 1.4.1. Tipos de cargas en AC.

La principal característica de la corriente alterna es que su polaridad que es variable en el tiempo en la actualidad, esta es la forma más eficiente de transportar la energía, por lo que la mayoría de los dispositivos eléctricos se alimenta de corriente alterna, como por ejemplo electrodomésticos, motores AC etc.

#### 1.4.2. Tipos de cargas en DC.

Todo tipo de aparato eléctrico que este diseñado con una alimentación de flujo continuo, es decir, el voltaje que se inyecte no cambie el sentido de la polaridad con respecto al tiempo, se considera una carga DC. las principales fuentes de energía DC son baterías, dinamos, células fotovoltaicas o cualquier generador que genere tensión constante, los ejemplos de cargas de corriente continua son generalmente dispositivos electrónicos como: celulares, computadores.

### 1.5 Resumen del capítulo I.

En este capítulo se ha analizado los componentes básicos de un sistema fotovoltaico como también el almacenamiento de energía. Para esto se describió los componentes como paneles solares, y convertidores. Además, se explicó en detalle las diferencias entre varios tipos de almacenamiento como baterías y supercapacitores. Finalmente, se detalló algunas topologías para un sistema fotovoltaico con baterías, supercapacitores y cargas variables. De estas topologías, en el siguiente capítulo se propone un circuito para el control de cargas variables cuando existe una alimentación variable como lo es la generación fotovoltaica.

## **CAPÍTULO II**

### **Metodología**

El presente capítulo explica el diseño y control de un sistema fotovoltaico para la alimentación de una carga variable en corriente continua. Para esto, se considera dos tipos de almacenamiento: baterías de litio para una respuesta lenta y supercapacitores para entrega rápida de energía. Para esta solución se propone el uso de dos convertidores de potencia de DC/DC.

Es por esto que el objetivo del presente capítulo es presentar el diseño de cada uno de los componentes: matriz fotovoltaica, baterías, supercapacitores considerando también los circuitos electrónicos necesarios para el control de voltaje, corriente y potencia de acuerdo a la carga variable.

#### **2.1. Circuito propuesto.**

El circuito propuesto contiene cuatro partes principales: sistema fotovoltaico, sistema de almacenamiento de baterías, sistema de almacenamiento por supercapacitores y la carga variable como se muestra en la figura 15. En el caso del sistema fotovoltaico este está constituido por una matriz fotovoltaica y un convertidor DC/DC elevador.

En el sistema de almacenamiento de baterías se considera un arreglo de baterías que se conecta a un convertidor DC/DC tipo C Bidireccional. El mismo convertidor se utiliza para el sistema de almacenamiento del supercapacitor. Se utilizan ambos sistemas de almacenamiento debido a que las baterías compensan la densidad de energía que necesita el sistema mientras tanto los supercapacitores actúan ante repentinas fluctuaciones en la potencia.

Los sistemas de almacenamiento cuentan con un convertidor DC/DC bidireccional conectado en paralelo, que se encarga de suministrar energía y también recibirla, es importante mencionar que todos los subsistemas están conectados mediante un enlace DC hacia la carga.

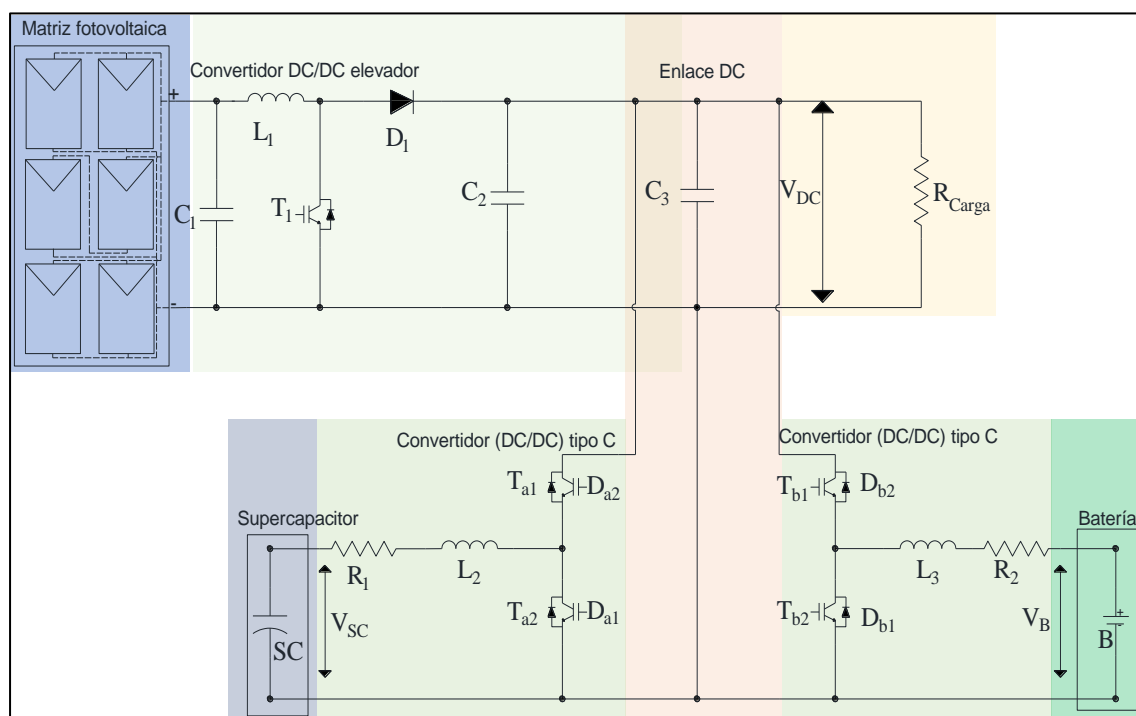


Fig. 15 Sistema fotovoltaico autónomo con almacenamiento híbrido.

Fuente: (Autor,2020).

### Características de la carga.

Este sistema considera como carga dos motores de corriente continua que los datos de placa se muestran a continuación (ABB Baldor Reliancer, 2019).

TABLA 2.1  
Parámetros eléctricos de las cargas en DC.

Potencia (P)	750 W
Voltaje (V)	90 V
Corriente (I)	8.33 A

Fuente: (Autor,2020).

La aplicación de los motores de corriente continua es específicamente para bombeo de agua y una bomba de vacío, ubicado en la Provincia del Carchi-Ecuador, Coordenadas geográficas (0.606983, -77.807236) y su temperatura promedio es 9° a 25° C.

Para realizar el diseño es necesario el análisis del consumo eléctrico el cual se muestra en la tabla 2.2, para una potencia total de energía de 1500W la energía diaria es de 6750 Wh/día, un promedio de 154 kWh/Mes y 1851 kWh/Año.

TABLA 2.2 Análisis del consumo eléctrico

Demanda de energía eléctrica							
Cargas	Unidades	Potencia	Horas de Uso al día	Días de Uso a la semana	Energía diaria	Energía Diaria promedio	Potencia total
	[u]	[W]	[h/día]	[días/semana]	[Wh/día]	[Wh/Día]	[W]
Motor 1	1	750	4	7	3000	3000	750
Motor 2	1	750	5	4	3750	2143	750
TOTAL ENERGÍA (Wh)					6.750	5.143	1.500
TOTAL ENERGÍA PROMEDIO MENSUAL [kWh/mes]						154	
TOTAL ENERGÍA PROMEDIO ANUAL [kWh/año]						1851	

Fuente: (Autor,2020).

### 2.1.1. Diseño de la matriz fotovoltaica.

La potencia requerida por el sistema fotovoltaico es de hasta 1500 W , la capacidad de módulo fotovoltaico no es suficiente por lo que es necesario realizar arreglos con conexiones en serie, paralelo en este diseño se emplean los paneles fotovoltaicos SunPower SPR-240E-WHT-D (SunPower, 2019), cuyas característica se detallan en la Tabla 2.3.

TABLA 2.3  
Características del panel fotovoltaico

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Potencia pico	$P_{max}$	240	W
Celdas por panel	$N_{cell}$	72	-
Voltaje en circuito abierto	$V_{oc}$	48.6	V
Corriente de corto circuito	$I_{sc}$	6.30	A
Voltaje MPP	$V_{mpp}$	40.5	V
Corriente MPP	$I_{mpp}$	5.93	A

Fuente: (Autor,2020).

Para el diseño de la matriz fotovoltaica se empieza por el cálculo del consumo total de energía demandada durante el día, que va a ser el producto de la energía promedio por un factor que hace que el sistema sea más conservador.

$$\text{Energía demandada} = \text{Energía diaria promedio Wh/Día} \times \text{factor de corrección} \quad (1)$$

$$\text{Energía demandada} = 5.143 \times 1.2 = 6171,43 \text{ Wh/día.}$$

El siguiente paso, calculamos la potencia de la matriz fotovoltaica, ya que la energía demandada es la que se necesita en la selección de la carga, pero desde la matriz fotovoltaica hasta la carga hay pérdidas en el camino se puede perder un 9% en los 3 convertidores, 10% en el sistema de almacenamiento, 3% en los conductores y 3% por suciedad. Entonces la eficiencia del sistema fotovoltaico es del 75%.

$$\begin{aligned} \text{Energía total demandada} \times \text{eficiencia FV} &= \text{Energía a generar} \\ &= 6171,43 \text{ Wh/día} \times 75\% = 8228,57 \text{ Wh/día} \end{aligned} \quad (2)$$



Tercer paso es calcular las horas solares pico<sup>3</sup>, para lo cual necesitamos la irradiación mensual promedio y escoger el mes en el que tengamos menor irradiación solar para asegurarnos que en el peor caso la carga tenga energía.

La irradiación que se muestra en la tabla 2.4, obtenida de la plataforma Solargis indica que el peor mes es febrero con 4453 Wh/m<sup>2</sup> día.

TABLA 2.4 Irradiación mensual.

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
4728	4453	4702	4724	4642	4480	4592	4567	4929	5023	4847	4555

Fuente: (Solargis, 2020)

y de acuerdo con la ecuación 3 podemos calcular las horas solares pico.

$$HSP = \frac{4453 \text{ Wh/m}^2}{1000 \text{ W/m}^2} = 4.45 \text{ HSP} \quad (3)$$

De la misma manera el cociente de la energía total demanda con respecto a las horas solares pico nos da como resultado la potencia de nuestro sistema fotovoltaico.

$$\begin{aligned} \text{Energía total demandada} / \text{HSP} &= \text{Energía a generar} \\ \frac{8228.57}{4.45} &= 1847.87 \text{ W} \end{aligned} \quad (4)$$

El número de paneles en total necesarios será el cociente entre la potencia de energía a generar con respecto a la potencia del panel fotovoltaico.

$$\frac{\text{Energía a generar}}{\text{Potencia del panel fotovoltaico}} = \frac{1847.87 \text{ W}}{240 \text{ W}} = 7.70 \quad (5)$$

El número de paneles total elegido es de 8 paneles fotovoltaicos.

Para el cálculo de paneles serie hay que tomar en cuenta el voltaje en corriente continua de nuestro sistema por lo general para sistemas => a 1500 W el voltaje es de 48 V.

El número de paneles en serie de acuerdo con la ecuación 6 serán.

$$\begin{aligned} \frac{\text{Voltaje nominal FV}}{\text{Voltaje a maximapotencia}} \\ \frac{48 \text{ V}}{40.5} &= 1.19 \text{ paneles en serie} \end{aligned} \quad (6)$$

Aproximando al entero superior el número de paneles en serie elegido es de 2 paneles.

El número de módulos en paralelo de acuerdo con la ecuación 7.

$$\begin{aligned} \text{Número de paneles total} / \text{Número de paneles en serie} \\ \frac{8}{2} &= 4 \text{ cadenas en paralelo} \end{aligned} \quad (7)$$

---

<sup>3</sup> **Las horas solares pico (HSP).** Es una unidad que mide la irradiación solar y se define como la energía por unidad de superficie que se recibiría con una hipotética irradiancia solar constante de 1000 W/m<sup>2</sup>.

La inclinación óptima de la matriz fotovoltaica se calcula mediante la ecuación 8.

$$\beta = 3.7 + (0.69 \cdot \text{Latitud}) = 3.7 + (0.69 \times 0.606983) = 4.12^\circ \quad (8)$$

La inclinación óptima elegida es de  $10^\circ$  ya que es necesario para que el agua de la lluvia resbale. Para la orientación se escoge el norte, debido a que la ubicación está en el Ecuador terrestre y es indiferente elegir norte o sur.

Finalmente el diseño de la matriz se muestra en la figura 16, en la cual el arreglo es 4 cadenas en paralelo que da como resultado una capacidad de suministrar 23.72 A. a máxima potencia y 2 en serie que da como resultado 81 V. Para lograr los 90 V se utiliza el convertidor DC/DC elevador, es así como la matriz fotovoltaica cumple con las características que necesita la carga y el sistema.

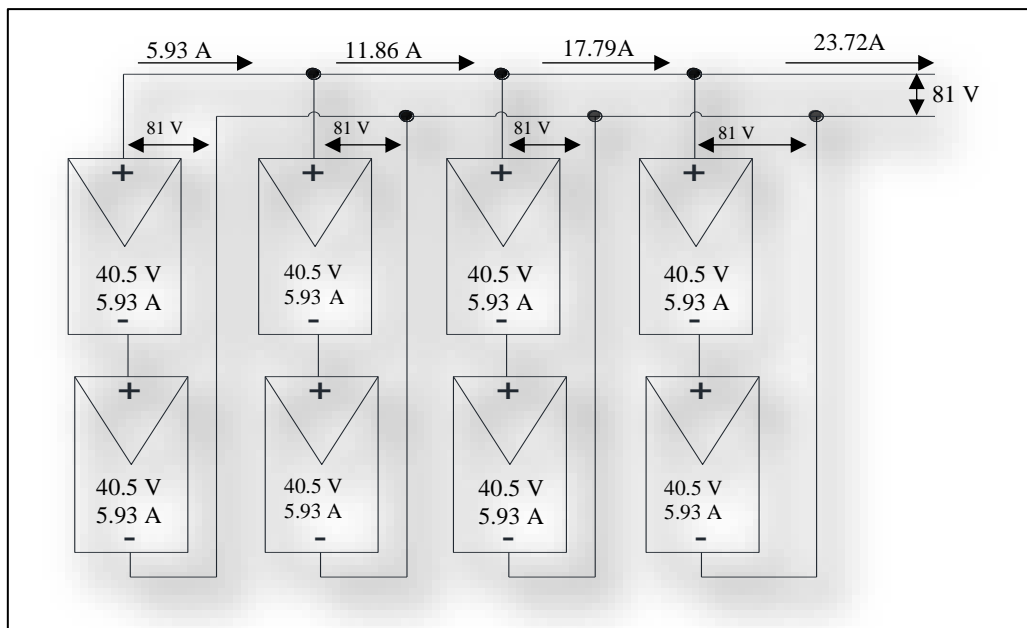


Fig. 16 Matriz fotovoltaica.  
Fuente: (Autor,2020).

### 2.1.1.1 Modelo de un panel fotovoltaico a utilizarse.

El circuito equivalente de la figura.16 incluye una fuente de corriente en paralelo con un diodo ( $D$ ), una resistencia en serie ( $R_s$ ) que representa la resistencia interna al flujo de corriente, y una resistencia en paralelo ( $R_{sh}$ ) que describe la corriente de fuga.

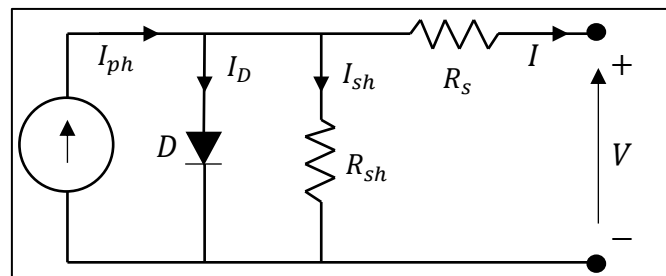


Fig. 17 Circuito equivalente de un panel fotovoltaico.  
Fuente: (Elbaset, Abdelwahab, Ibrahim, & Eid, 2019)

Las características de corriente y voltaje del panel fotovoltaico se expresan mediante la ecuación 9 (Elbaset et al., 2019).

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + IR_s)}{A \cdot K \cdot T} \right] - 1 \right\} - \left( \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (9)$$

La corriente generada ( $I_{ph}$ ) depende de la temperatura y la irradiancia y se expresa de la siguiente manera.

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - T_{ref})] \cdot \left( \frac{G}{1000} \right) \quad (10)$$

La corriente de saturación del panel fotovoltaico ( $I_s$ ) varia como una función cubica de la temperatura ( $T$ ) y se describe de la siguiente manera

$$I_s = I_{rs} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \frac{q \cdot E_g}{K \cdot A} \cdot \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (11)$$

La corriente de saturación interna  $I_{rs}$  se puede obtener mediante la siguiente ecuación.

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\left[ \exp \left( \frac{qV_{oc}}{N_{ser} \cdot K \cdot A \cdot T} \right) - 1 \right]} \quad (12)$$

Donde:

$I$ : Corriente de salida del panel fotovoltaico.

$I_{ph}$ : Corriente producida por el panel fotovoltaico.

$I_D$ : Corriente a través del diodo.

$I_{sh}$  Corriente a través de la resistencia  $R_{sh}$ .

$T$ : Temperatura de operación del panel fotovoltaico.

$T_{ref}$ : Temperatura de referencia.

$G$ : Irradiancia solar ( $W/m^2$ ).

$I_s$ : Corriente de saturación inversa.

$q$ : Carga del electrón ( $1.6 \times 10^{-19} C$ ).

$K$ : Constante de Boltzmann ( $1.3805 \times 10^{-23} Nm/K$ ).

$E_g$ : Banda de energía de la célula fotovoltaica.

$A$ : Factor de dualidad.

$N_{ser}$ : Número de paneles conectados en serie.

#### 1.2.1.6. Algoritmo perturbar y observar (P&O).

El algoritmo aplicado en este trabajo es P&O, debido a que es uno de los métodos MPPT más empleados por su sencillez y facilidad de implementación; además, el diseño del circuito de control es de bajo costo y se ha demostrado resultados satisfactorios.

El algoritmo (P&Q) mediante un conversor DC/DC Disminuye o aumenta el voltaje que suministra el panel fotovoltaico al mismo tiempo que supervisa la potencia. Esta variación se

logra mediante la única variable a la que el sistema tiene control y que es el ciclo de trabajo, si el valor actual de la potencia es mayor al valor anterior se aumenta el voltaje; caso contrario si el dato actual de la potencia es menor que el dato anterior se disminuye el voltaje si el sistema alcanza el MPP el algoritmo hace que oscile alrededor del mismo.

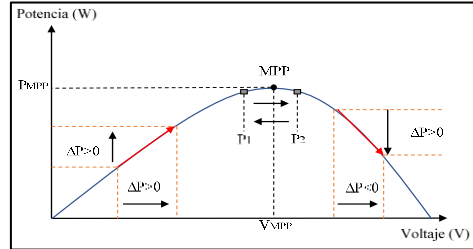


Fig. 18 Funcionamiento del algoritmo perturbar y observar.  
Fuente: (Vargas, 2018)

Diagrama de flujo del funcionamiento de algoritmo (P&O) para el seguimiento de punto de máxima potencia.

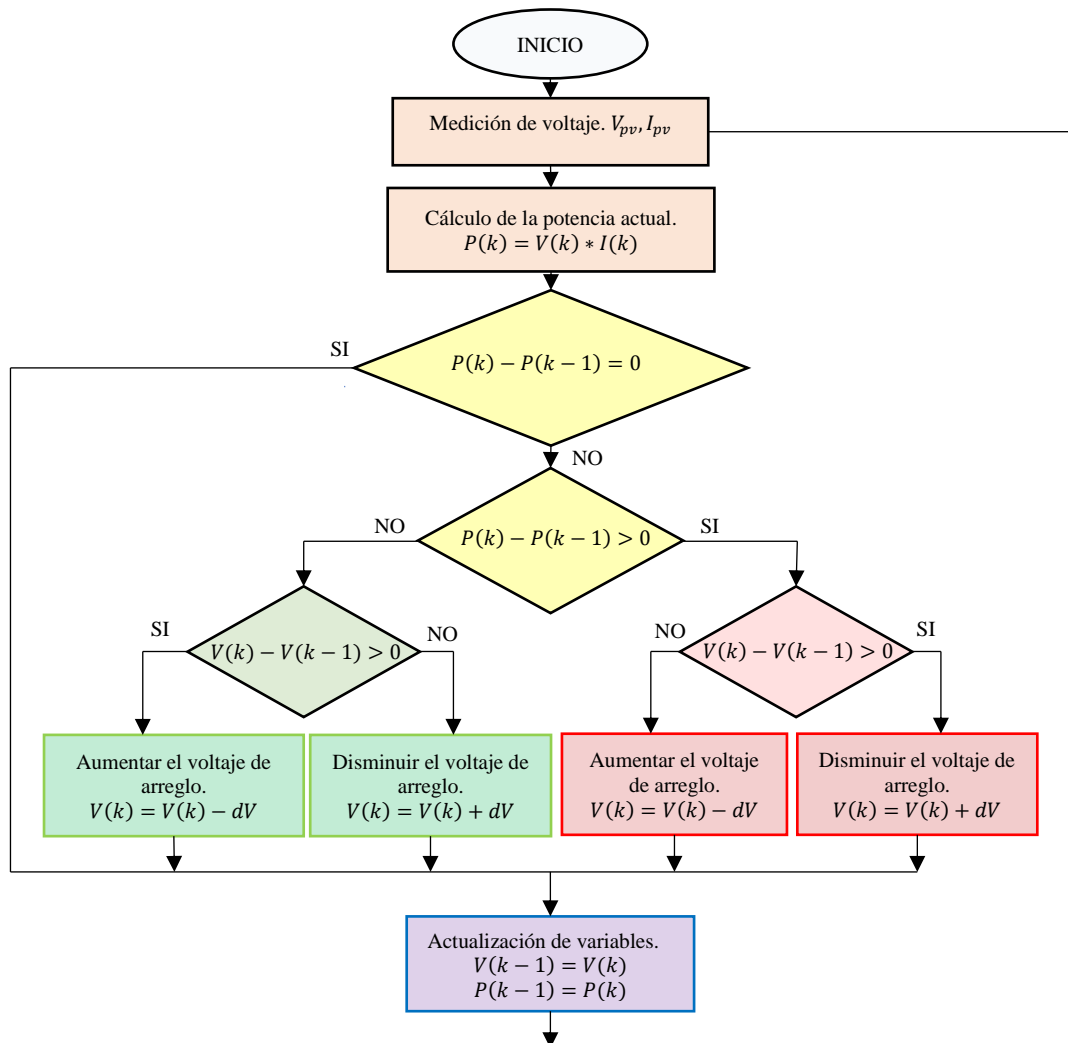


Fig. 19 Diagrama de flujo del funcionamiento P&O.

Fuente: (Canchola Zamora, Vazquez, Sosa, Martinez-Rodriguez, & Juarez, 2017).

$V_{pv}$  : Voltaje censado del panel fotovoltaico.

$I_{pv}$  : Corriente del panel fotovoltaico.

$P(k)$ ,  $V(k)$  y  $I(k)$  : Potencia, voltaje y corriente desde el panel en la interacción actual.

$P(k - 1)$  y  $V(k - 1)$  : Potencia, voltaje y corriente en interacciones pasadas.

$dV$  : Incremento de voltaje.

### 2.1.2. Diseño de sistemas de almacenamiento de energía.

El sistema de almacenamiento de energía (ESS) debe tener un tiempo de autonomía mayor a un día. Para que el sistema sea altamente efectivo se debe considerar que el ESS solventa las altas densidades de potencia y energía del sistema

Las baterías de litio se caracterizan por tener una alta densidad de energía y una alta eficiencia. Sin embargo, su tiempo de vida útil es generalmente de 5 años y es afectado por las altas corrientes de carga y descarga. Con el fin de aumentar la vida útil de la batería y cumplir con los requerimientos de alta densidad de potencia que requiere la carga se diseña el sistema de almacenamiento con supercapacitores.

### Diseño del banco de baterías.

TABLA 2.5  
Parámetros de diseño del banco de baterías.

Parámetro.	Símbolo	Valor	Unidad
Consumo total.	$C_T$	6171.43	Wh/Día
Días de autonomía.	$N_{días}$	1.85	Días
Voltaje nominal.	$V_{nBanco}$	51,6	V

Fuente: (Autor,2020).

Las características de la batería para el diseño se la muestran en la tabla. Se optó por la batería de la marca y modelo Vitron Energy LiFePO4 (Vitron Energy, 2019).

TABLA 2.6  
Características de la batería.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Voltaje nominal	$V_n$	25.8	V
Capacidad nominal	$C_n$	200	Ah
Profundidad de descarga	$P_d$	0.85	%

Fuente: (Autor,2020).

La capacidad del banco de baterías se desarrolla mediante la ecuación 13. El resultado de la ecuación nos proporciona que la capacidad del banco de batería debe de ser de alrededor de 600 Ah.

$$\begin{aligned} \text{Capacidad del banco} &= \frac{\text{Energía demandada} \cdot N_{\text{Días}}}{\text{Eficiencia} \cdot P_d \cdot V_{\text{instalación}}} & (13) \\ &= \frac{6171.43 \text{Wh/día} \times 1.85 \text{Días}}{0.8 \times 0.5 \times 48 \text{V}} = 594,64 \text{Ah} \end{aligned}$$

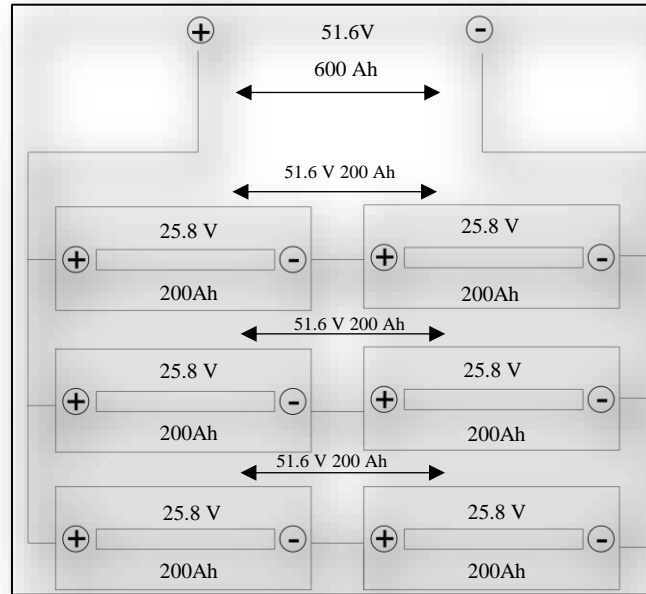


Fig. 20 Banco de baterías.  
Fuente: (Autor,2020).

### Modelo de una batería a utilizarse.

El modelo más común de la batería es representado en la figura 21, y representa la relación del voltaje de la batería  $V_{bat}$ , voltaje del circuito abierto  $V_{emf}$ , corriente de carga/corriente de descarga  $i_{bat}$ , resistencia interna  $R_1$  y un circuito compuesto por  $R_2$  y  $C_b$  en paralelo que representa la transferencia de carga y difusión entre el electrodo y el electrolito.

$$V_{bat} = V_{emf} - i_{bat} * \left( R_1 + \frac{R_2}{1 + C_b * R_2 * s} \right) \quad (14)$$

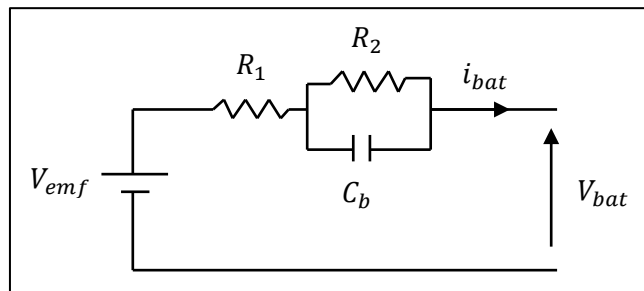


Fig. 21. Modelo de una Batería.  
fuente: (Jamshidpour & Saadate, 2016)

### Diseño del banco de supercapacitores.

Para el diseño del banco de supercapacitores se tiene en cuenta el voltaje del banco de baterías  $V$  considerando que utilizar 1% de supercapacitores puede mejorar el rendimiento en un 9.95% en las baterías (Guo & Sharma, 2016). En este sistema se utiliza 4 supercapacitores por cada batería aumentando la vida útil. Para el diseño del banco se emplea el modelo del supercapacitor Maxwell BCAP0350 (Maxwell, 2019).

TABLA 2.7  
Características eléctricas del banco de supercapacitores.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Capacidad nominal	$C_{SC}$	350	F
Resistencia interna	$R_{SC}$	3.2	mΩ
Voltaje nominal	$V_{SC}$	2.85	V
Corriente máxima	$I_{MAX}$	170	A
Potencia máxima	$P_{MAX}$	9,500	W/kg
Peso	P	60	g

Fuente: (Autor,2020).

Para lograr el voltaje requerido en la instalación fotovoltaica es necesario conectar los supercapacitores en serie, sin embargo, esto reducirá el valor de la capacitancia en comparación con la capacitancia de cada supercapacitor, en la ecuación 15 se calcula el número de supercapacitores en serie, que resulta 17 supercapacitores, en la ecuación 16, se demuestra que la capacitancia es de 20.78 F

$$N^{\circ} SC = \frac{48V}{2.85} = 16.84 \text{ Supercapacitores} \quad (15)$$

$$\frac{1}{C_{sc}} = \sum \frac{1}{C_i} \Rightarrow \frac{1}{C_{sc}} = \frac{17}{350} \Rightarrow C_{sc} = \frac{1}{\frac{17}{350}} = 20.59 \text{ f} \quad (16)$$

La capacidad total del banco de supercapacitores se detalla en la tabla 2.8 y en la figura 20. se aprecia arreglo en serie de los supercapacitores.

TABLA 2.8  
Características eléctricas del banco de supercapacitores.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Capacidad nominal	$C_{bancoSC}$	20.59	F
Resistencia interna	$R_{bancoSC}$	53.89	mΩ
Voltaje nominal	$V_{bancoSC}$	48	V
Corriente máxima	$I_{bancoMAX}$	170	A

Fuente: (Autor,2020).

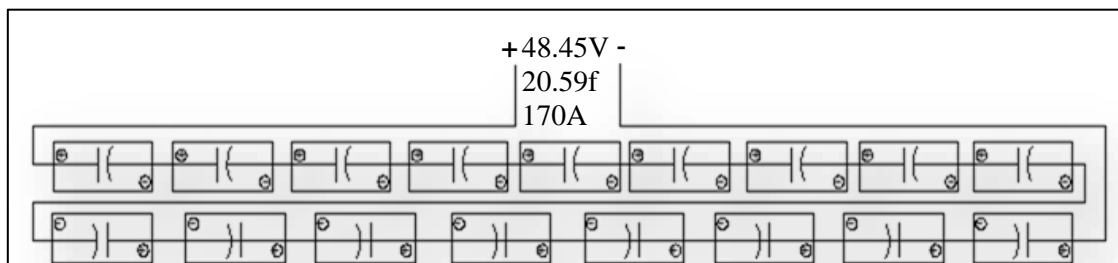


Fig. 20 Banco de supercapacitores.  
Fuente: (Autor,2020).

### Modelo del supercapacitor a utilizarse.

La figura 22 muestra el modelo del supercapacitor que comúnmente se utiliza este modelo consta de tres parámetros una capacitancia  $C_{sc}$  una resistencia en serie equivalente  $R_{scs}$  que representa la carga y la descarga y una resistencia  $R_{scp}$  en paralelo que representa las pérdidas de Autodescarga.

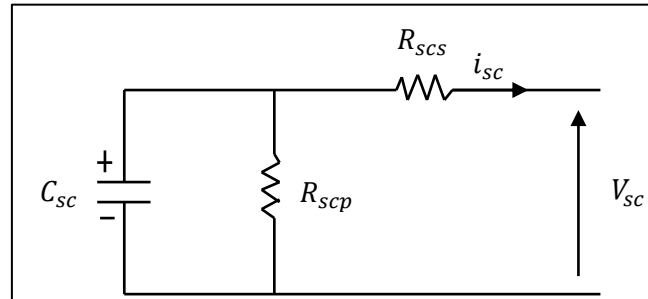


Fig. 22 Modelo de un supercapacitor  
Fuente: (Jamshidpour & Saadate, 2016)

## 2.2. Diseño del circuito electrónico.

En el desarrollo de los convertidores se considera el uso transistores que funcionan como interruptores. En este caso se selecciona el transistor IGBT(Insulate Gate Bipolar Transistor), precisamente el modelo Hybrid IGBT 50A, 650V (AFGHL50T65SQDC) (Onsemi, 2019), ya que es utilizado en aplicaciones de potencias intermedia y menores perdidas de conmutación y conducción (Rashid, 2015).

### 2.2.1. Diseño del convertor elevador.

A la salida de la matriz fotovoltaica se conecta un convertor DC/DC. Este convertor tiene dos objetivos principales. El primero es controlar el voltaje a los terminales de la matriz a través de un algoritmo P&O para asegurar el trabajo en el punto máximo de potencia. El segundo es elevar el voltaje de acuerdo con los requerimientos de la carga.

TABLA 2.9  
Parámetros para el diseño del convertor DC/DC elevador.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Voltaje Nominal	$V_{DC}$	90	V
Voltaje de entrada	$V_{in}$	81	V
Corriente	$I$	23,72	A
Frecuencia de conmutación	$f_T$	30	kHz
Ciclo de trabajo	D	0.1	-
Potencia a la carga	P	1921,32	W

Fuente: (Autor,2020).

El ciclo de trabajo se calcula en función del voltaje de entrada con respecto al voltaje de salida y está dado por la ecuación 17 (Astudillo & Lema, 2017)



$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} = 1 - \frac{81}{90} = 0.1 \quad (17)$$

La inductancia se la calcula mediante la ecuación 18 (Astudillo & Lema, 2017). La inductancia está diseñada para una corriente de 23.72 A y se establece el rizado de 2%, la frecuencia de conmutación del transistor es de 30 kHz ya que si es menor a 20 kHz aumenta las variaciones de corriente en la bobina y es demasiado grande tendrá pérdidas por conmutación.

$$L = \frac{V_{in}}{f_t \cdot 2\Delta i_{L_1}} D = \frac{81}{30000 \times 2(0.4)} 0.1 = 0.0003375H \quad (18)$$

Para el diseño de capacitor es necesario calcular la resistencia de carga que emula la potencia máxima del conversor, para lo cual se emplea la ecuación 19 (Astudillo & Lema, 2017).

$$R_c \frac{V_s^2}{P} = \frac{90^2}{1921,32} = 4,22\Omega \quad (19)$$

$V_s$  = Voltaje de salida del conversor.

$P$  = Potencia Inyectada hacia la carga.

En el cálculo de capacitor se ven involucrados la frecuencia de conmutación el voltaje la resistencia de capacitor y se establece la variación del voltaje del capacitor con el rizado del 2%, los resultado se expresan en la ecuación 20 y 21 (Astudillo & Lema, 2017).

$$\Delta V_{c1} = \% \cdot V_{out} = 0.02 \times 90 = 1.8 V \quad (20)$$

$$C = \frac{V}{f_t \cdot 2\Delta V_{c1} \cdot R} D = \frac{90}{30000 \times 2(1,8) \times 4,22} 0.1 = 19,76 \mu F \quad (21)$$

En la figura 23, se muestra el diagrama de conversor DC/DC elevador con los respectivos valores de inductancia y de capacitancia.

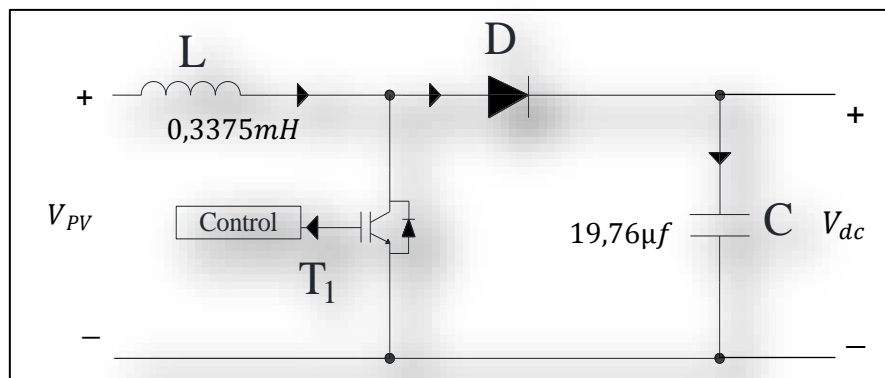


Fig. 23 Conversor DC/DC elevador.  
Fuente: (Autor,2020).

La simulación del convertor con los valores predeterminados en la figura 24 cumple con elevar el voltaje de 81 V a 90V, a pesar de que existe un sobre impulso el tiempo de acentamiento es inferior 0.0015 segundos y el rizado del voltaje es del 2% tal como se planteo en el diseño.

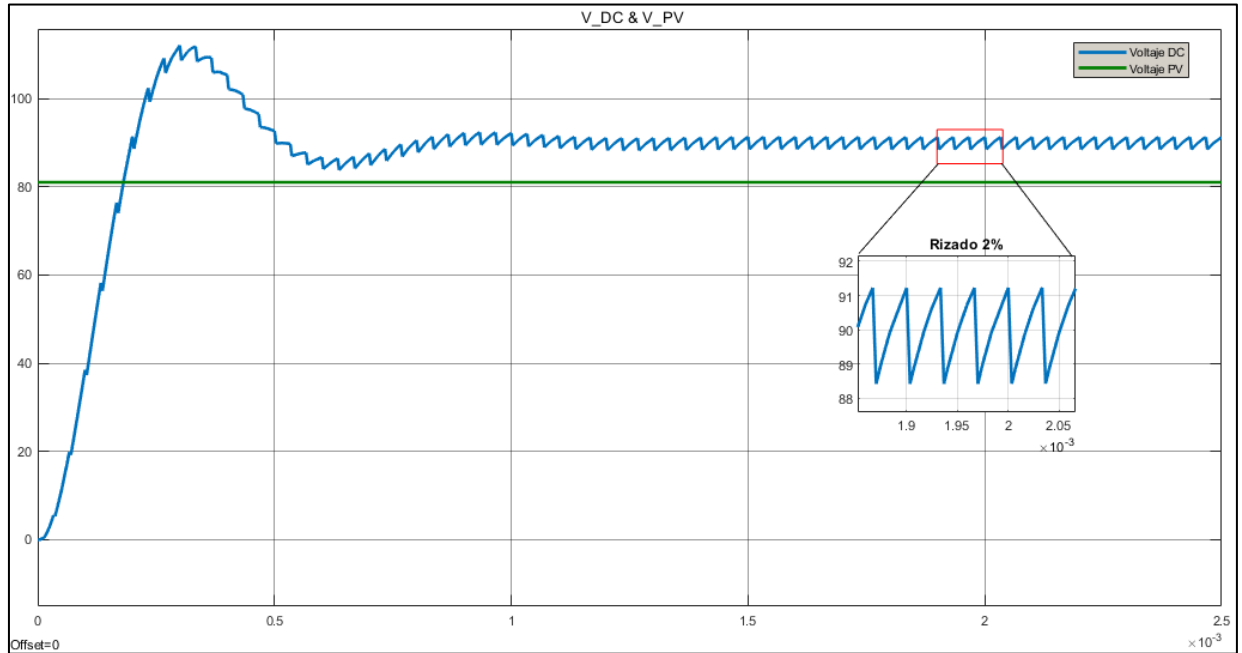


Fig. 24 Simulación Convertidor DC/DC elevador.  
Fuente: Matlab Simulink (Autor,2020).

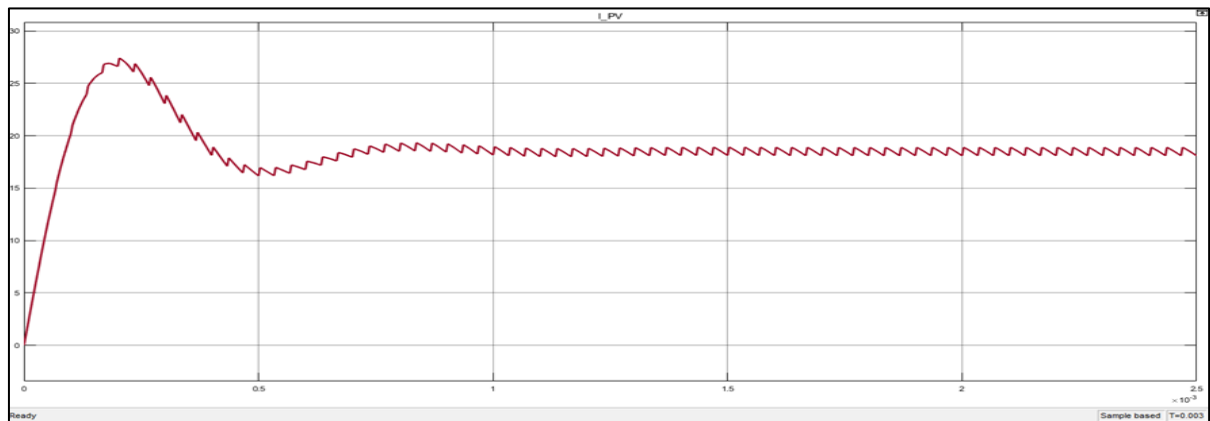


Fig. 25 Simulación de corriente Convertor elevador.  
Fuente: Matlab Simulink (Autor,2020).

### 2.2.2. Diseño de los conversores DC/DC tipo C.

En el diseño de los conversores es importante el dimensionamiento de la inductancia y la capacitancia. Un convertor trabaja en dos modos: continuo y discontinuo, lo ideal para este diseño es trabajar en el modo continuo ya que trabajar en modo discontinuo presenta un efecto negativo llamado “rizado parásito” (Moghaddam, Ayatollahi, & Rahmati, 2012).

Los parámetros que determinan el diseño del sistema se muestran en la tabla 2.10.

TABLA 2.10  
Parámetros del sistema para el diseño de convertor DC/DC tipo C.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Potencia nominal	$P_{nom}$	19,21	W
Voltaje de salida	$V_{out}$	90	V
Corriente de salida	$I_{out}$	23,72	A
Voltaje de entrada	$V_{sc}$	48,45	V
Voltaje de entrada	$V_{batt}$	51,2	V
Frecuencia de conmutación	$f_{sw}$	20	kHz
Rizado máximo de corriente	$\Delta i_L$	2%	pu
Rizado máximo de voltaje de salida	$\Delta V_{out}$	2%	pu

Fuente:(Autor, 2020).

En un convertor la señal de salida depende del ciclo de trabajo ( $D$ ). y para calcular el ciclo de trabajo se tiene en cuenta el voltaje de salida  $V_{out}$  y el voltaje de entrada  $V_{in}$  en un convertor DC/DC Tipo C se determina por medio de las ecuaciones 21 y 22.

TABLA 2.11  
Ciclo de trabajo.

	Modo elevador.	Modo Reductor.
Ciclo de trabajo. ( $D$ )	$D_1 = 1 - \frac{1}{\frac{V_0}{V_i}}$ ( 22)	$D_2 = \frac{V_0}{V_i}$ ( 23)
En modo de descarga del sistema de almacenamiento (Elevador). $V_0 = V_{Bus}$ y $V_i = V_{Bat:Sc}$ En modo carga del sistema de almacenamiento (reductor). $V_0 = V_{Bat:Sc}$ y $V_i = V_{Bus}$		

Fuente:(Schupbach & Balda, 2003).

#### a). Convertor DC/DC para el banco de baterías.

Ciclo de trabajo del convertor en modo elevador para el banco de baterías se lo calcula mediante la ecuación 23.

$$D_1 = 1 - \frac{1}{\frac{90}{51,2}} = 0,43 \quad ( 24)$$

La inductancia mínima se calcula, relacionando la frecuencia de PWM del transistor ( $f_{sw}$ ) el ciclo de trabajo ( $D$ ) y la resistencia equivalente de la carga ( $R_c$ ). Mediante la ecuación 24 (Malo Rojas, 2015).

$$L_{min} = \left[ \frac{R}{2 \cdot f_{sw}} D_1 (1 - D_1)^2 \right] \quad ( 25)$$

La resistencia de la carga es  $4.38\Omega$  , de acuerdo con la ecuación 19 asumiendo la potencia del sistema Fotovoltaico, ecuación 4 (1847,87 W), la frecuencia de conmutación del IGBT es de 20kHz. La inductancia mínima se muestra en la ecuación 25.

$$L_{minbat} = \left[ \frac{4,38}{2 \times 20000} 0.43(1 - 0.43)^2 \right] = 0,000152896 \text{ H} \quad ( 26)$$

Para que el convertor trabaje correctamente la inductancia debe ser mayor a la obtenida en la ecuación 26.

Se diseña el convertor de tal forma que pueda alimentar una carga de 1500 W. Un estimado para el rizado de la corriente cuando no se conoce la inductancia es mediante la ecuación 26 donde el valor permitido del rizado de corriente es del 2%. (Malo Rojas, 2015)

$$\Delta i_L = \% \cdot I_{out} \cdot \frac{V_{out}}{V_{batt}} = 0.02 \times 23,72 \times \frac{90}{51,2} = 0.83 \text{ A} \quad (27)$$

En la ecuación 27 se realiza el cálculo de la inductancia para el convertor

$$L_{batt} = \frac{V_{batt} \cdot (V_{out} - V_{batt})}{\Delta i_L \cdot f_{sw} \cdot V_{out}} = \frac{51,2 \times (90 - 51,2)}{0.833 \times 20000 \times 90} = 1,32 \text{ mH} \quad (28)$$

La capacitancia del convertor es útil para mantener estable el voltaje a la salida del convertor, para hallar la capacitancia se hace mediante la ecuación 28.(P. Ávila, 2017)

$$\Delta V_{out} = \% \cdot V_{out} = 0.02 \times 90 = 1.8 \text{ V} \quad (29)$$

$$C_{1batt} = \frac{I_{out}}{f_{sw} \cdot \Delta V_{out}} \cdot D = \frac{23,72}{20000 \times 1.8} \cdot 0.43 = 284,054 \mu\text{F} \quad (30)$$

La figura 25 muestra el diseño final de convertor para la batería.

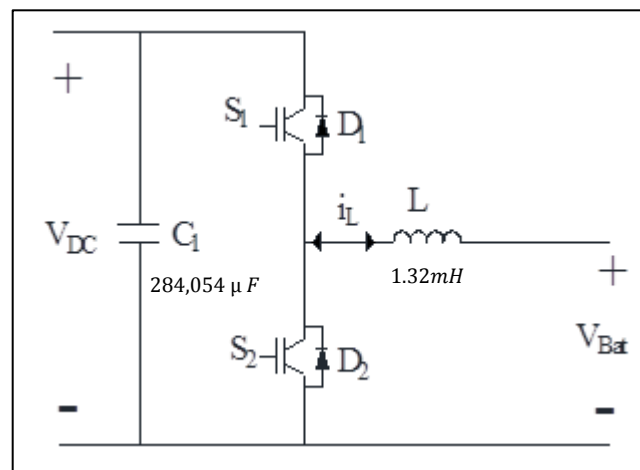


Fig. 26 Convertor DC/DC tipo C para las baterías.  
Fuente: (Autor, 2020).

La simulación del convertor Bidireccional con los valores predeterminados en la figura 27 cumple con elevar el voltaje de 52 V a 90V el tiempo de asentamiento es inferior 0.02 segundos y el rizado del voltaje es del 2% tal como se planteó en el diseño.

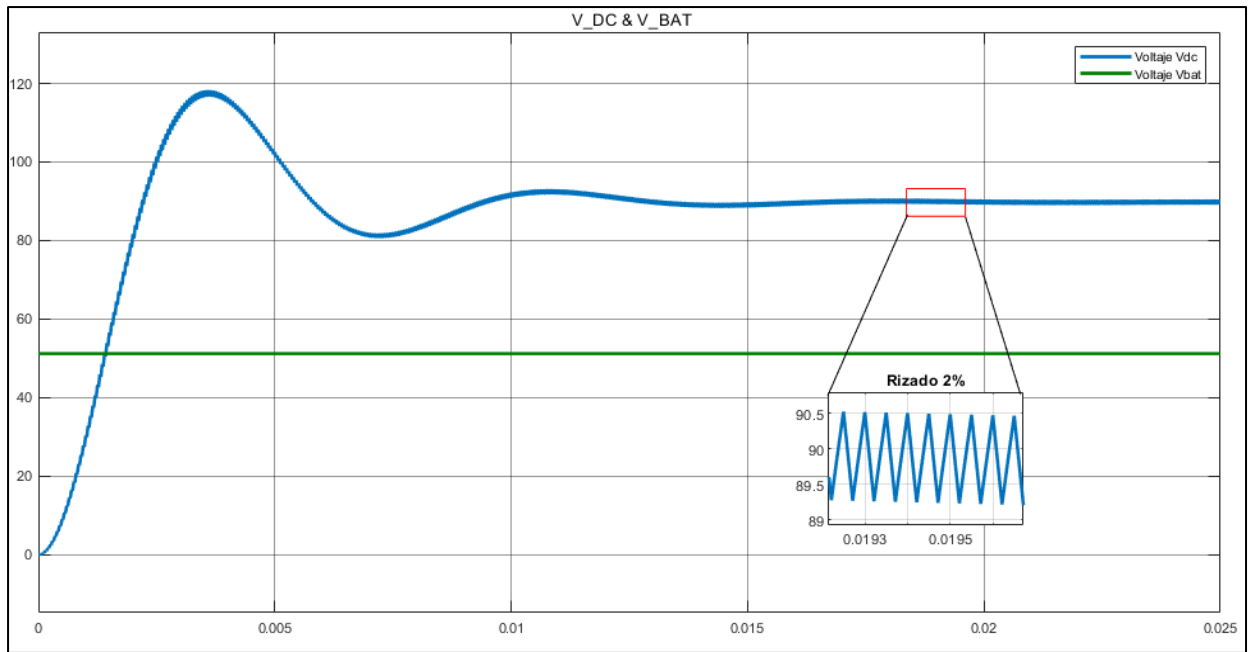


Fig. 27 Simulación del convertido Bidireccional del banco de baterías.  
Fuente Matlab Simulink (Autor,2020).

La corriente se comporta muy similar al voltaje y su tiempo de asentamiento esta alrededor de 0.015 segundos. La figura 28 muestra la corriente del conversor bidireccional del banco de baterías.

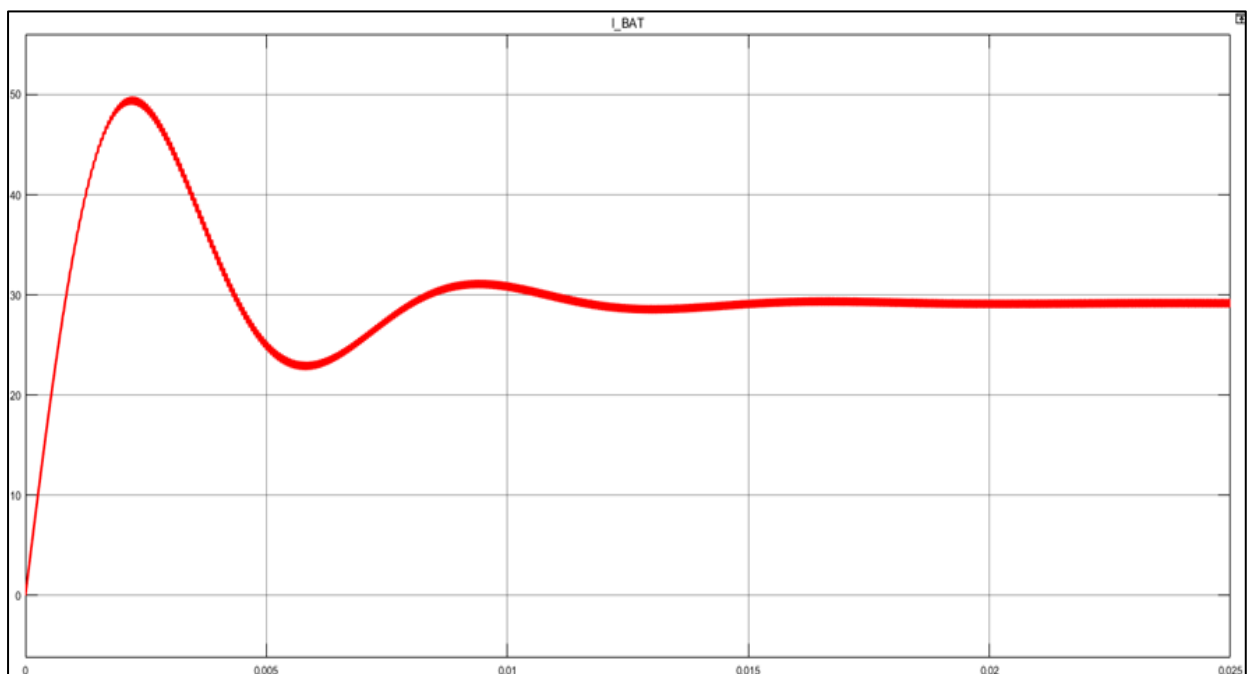


Fig. 28 Simulación de corriente Converso batería.  
Fuente: Matlab Simulink (Autor,2020).

### b). Conversor DC/DC tipo C con supercapacitores.

El diseño de la inductancia se relaciona con el voltaje nominal del banco, el rizado máximo de corriente en inductor  $L$  y la frecuencia de conmutación  $f_{sw}$  del IGBT y el ciclo de trabajo  $D$ , mediante la ecuación propuesta en (Liu, Mao, Lu, & Wang, 2009),

$$D_1 = 1 - \frac{1}{\frac{90}{48,45}} = 0.462 \quad (31)$$

$$\Delta i_L = \% \cdot I_{out} \cdot \frac{V_{out}}{V_{SC}} = 0.02 \times 23,72 \times \frac{90}{48,45} = 0.88 \text{ A} \quad (32)$$

$$L_{sc} = \frac{V_{DC}}{f_{sw} \cdot \Delta i_L} \cdot D(1 - D) = \frac{90}{20000 \times 0.88} \cdot 0.46(1 - 0.46) = 1.27 \text{ mH} \quad (33)$$

La capacitancia del conversor se obtiene al desarrollar la ecuación 34, la cual relaciona la corriente de la carga, la variación de voltaje de salida con un factor de rizado del 2% y la frecuencia de conmutación del IGBT (Liu et al., 2009).

$$\Delta V_{out} = \% \cdot V_{out} = 0.02 \times 90 = 1.8 \text{ V} \quad (34)$$

$$C_{sc} = \frac{I}{f_{sw} \cdot \Delta V_{out}} D(1 - D) = \frac{23,72}{20000 \times 1.8} \cdot 0.46(1 - 0.46) = 163,75 \mu\text{F} \quad (35)$$

La figura 29 muestra el diseño final de conversor para banco de supercapacitores, y la figura 30 muestra la simulación del conversor Bidireccional con los valores de inductancia y capacitancia predeterminados, demostrando que cumple con elevar el voltaje de 48 V a 90V el tiempo de asentamientos es inferior 0.015 segundos y el rizado del voltaje es del 2% tal como se planteó en el diseño.

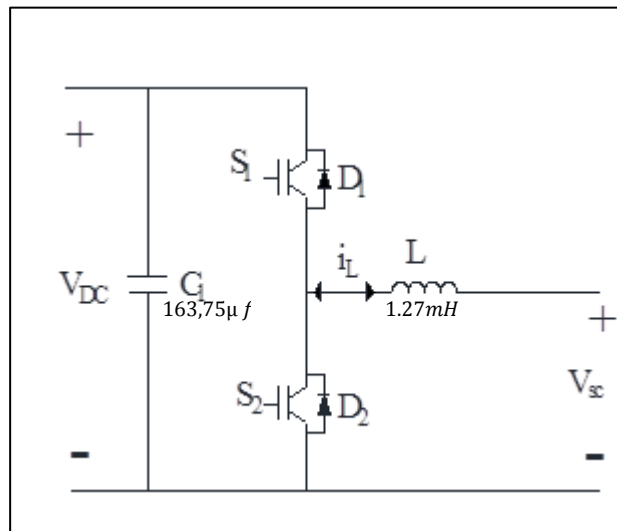


Fig. 29 Conversor DC/DC tipo C para supercapacitores  
Fuente: (Autor, 2020).

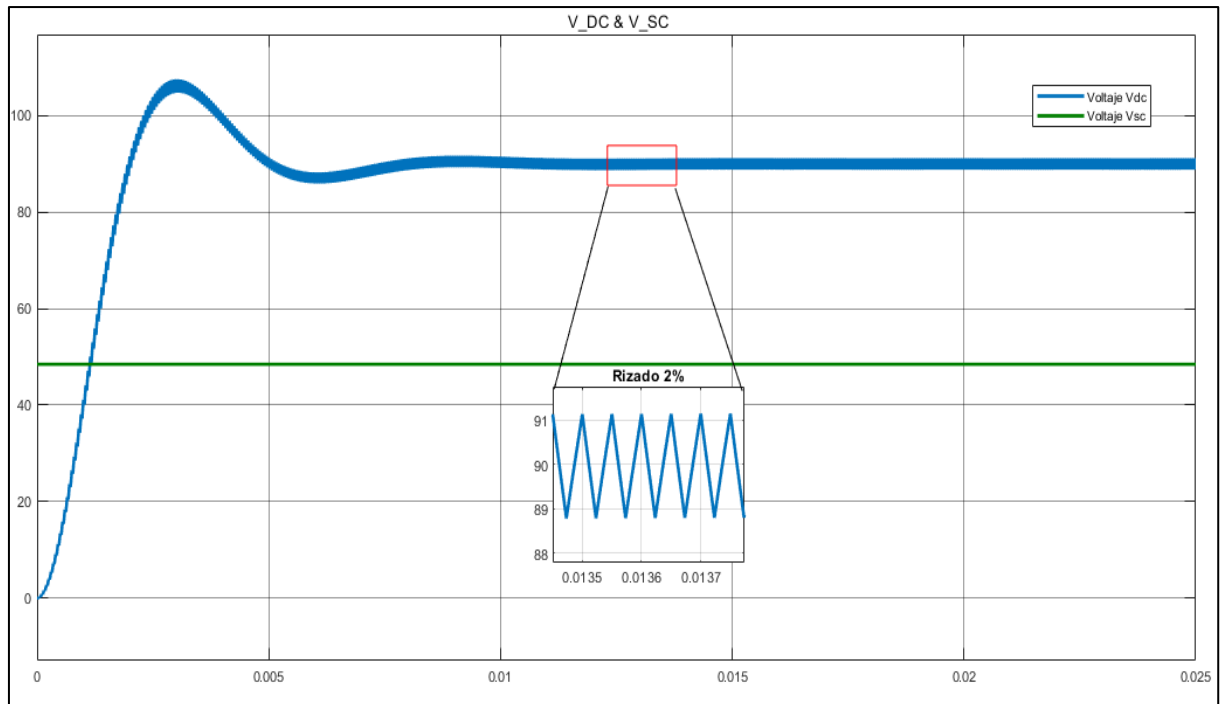


Fig. 30 Simulación del convertidor bidireccional del banco de supercapacitores.  
Fuente: Matlab Simulink (Autor,2020).

La figura 31 muestra la corriente de conversor bidireccional del banco de supercapacitores su tiempo de asentamiento es del 0.01 segundos.

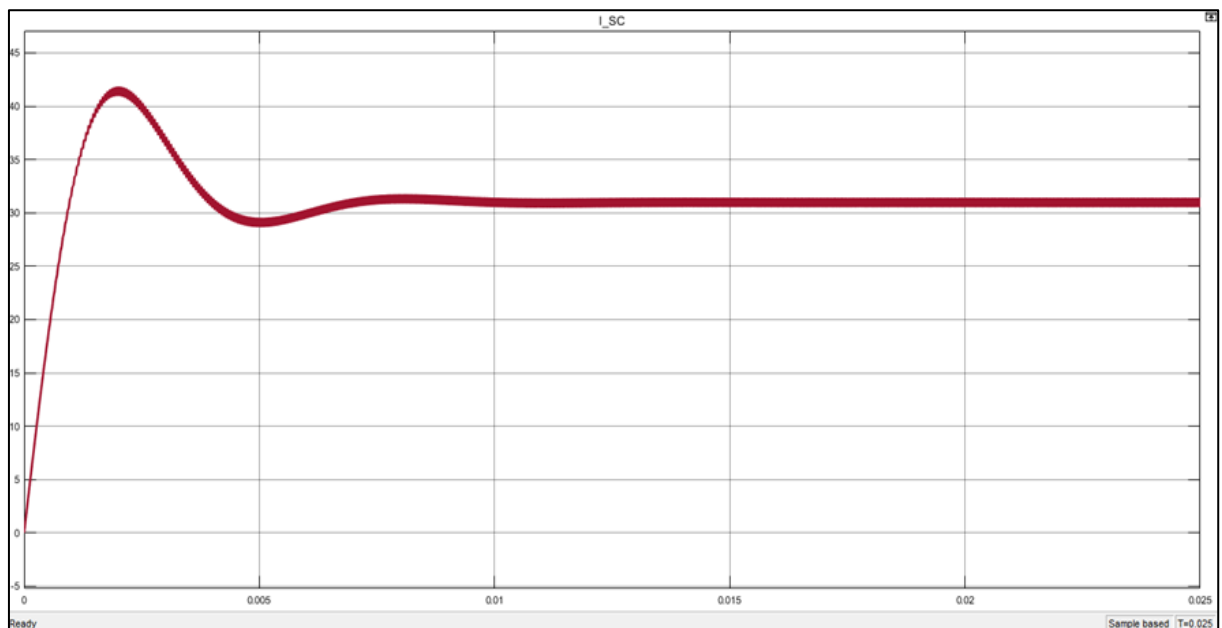


Fig. 31 Simulación de corriente conversor bidireccional Supercapacitores.  
fuente: Matlab Simulink (Autor,2020).

## 2.3 Resumen del capítulo II.

El diseño final contiene 8 paneles fotovoltaicos, 6 baterías de Ion-Litio un conversor DC/DC elevador y dos conversores DC/DC Tipo C Bidireccionales, los datos de Corrientes, Voltajes, Capacitancia e Inductancia se muestran en la figura 32, la instalación se ubica en Carchi Ecuador y la potencia fotovoltaica que se va generar será 1847.87 W a voltaje de 90 voltios la irradiación promedio mensual de la zona va ser de 4453 Wh/m<sup>2</sup> los días de autonomía del banco de almacenamiento híbrido van a ser de 2 días y la carga que van a alimentar son 2 motores de 1 hp cada uno.

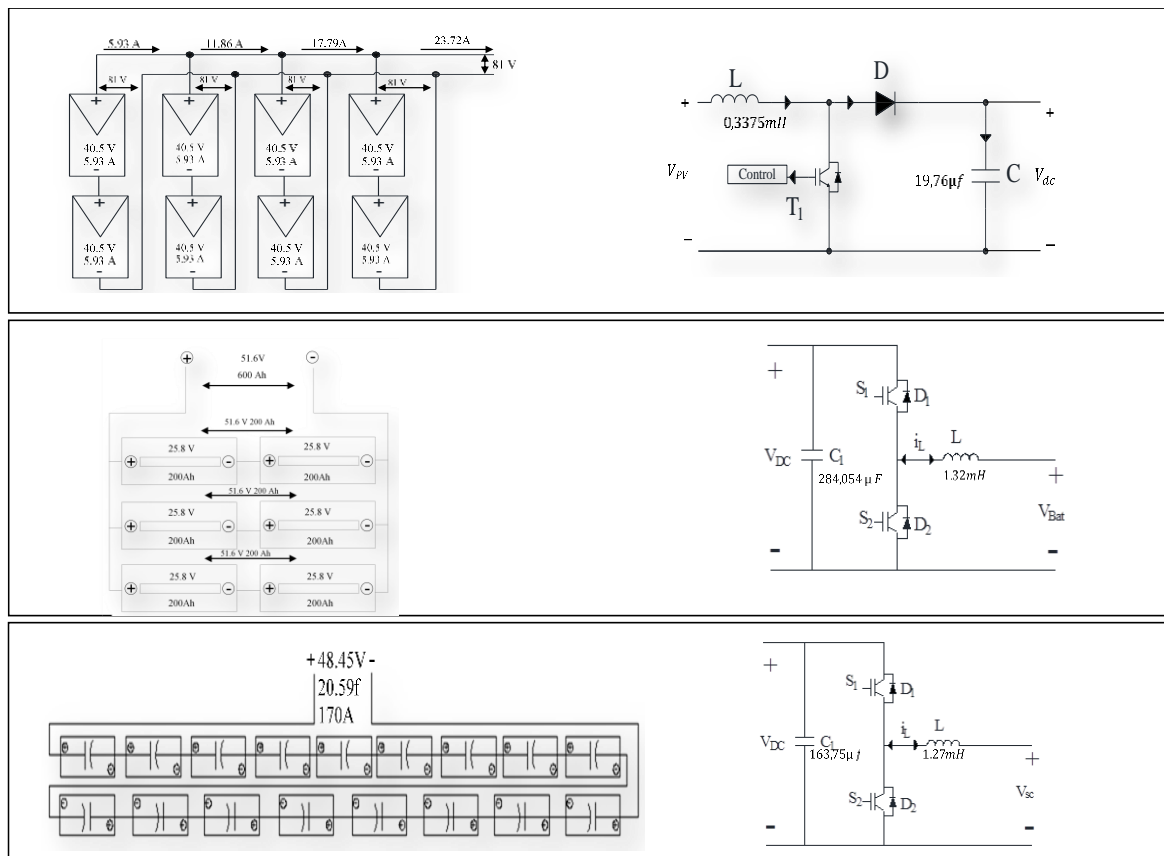


Fig. 32 Diseño DE la matriz Fotovoltaica Conversores y Bancos de almacenamiento  
Fuente: (Autor,2020).



## CAPÍTULO III

### Resultados

En este capítulo se efectuarán las respectivas simulaciones del sistema fotovoltaico con el almacenamiento híbrido compuesto de supercapacitor, baterías, y la carga de demanda variable, para verificar el diseño que se propuso en el capítulo anterior. Los resultados y formas de onda verifican y validan el control y gestión de energía por parte de los conversores. El sistema es diseñado y simulado en el software Matlab-Simulink.

#### 3.1 Esquema del sistema de simulación baterías y supercapacitores.

Para realizar los respectivos análisis se desarrolla el modelo de la figura 33 y se simula de acuerdo con el desarrollo del diseño del capítulo anterior. La potencia del sistema estará alrededor de 1500 W. La tensión del enlace es de 90 Voltios de corriente continua.

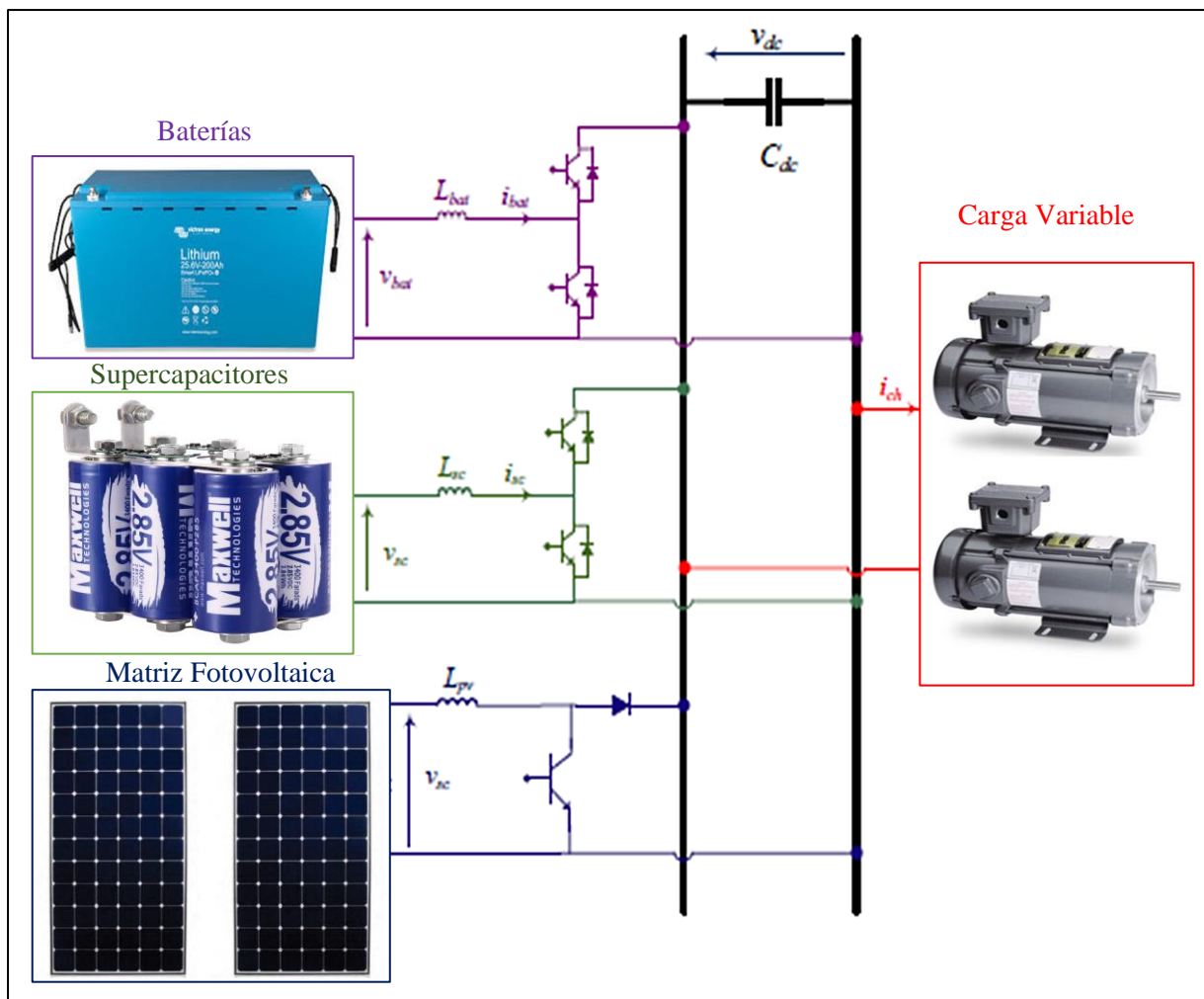
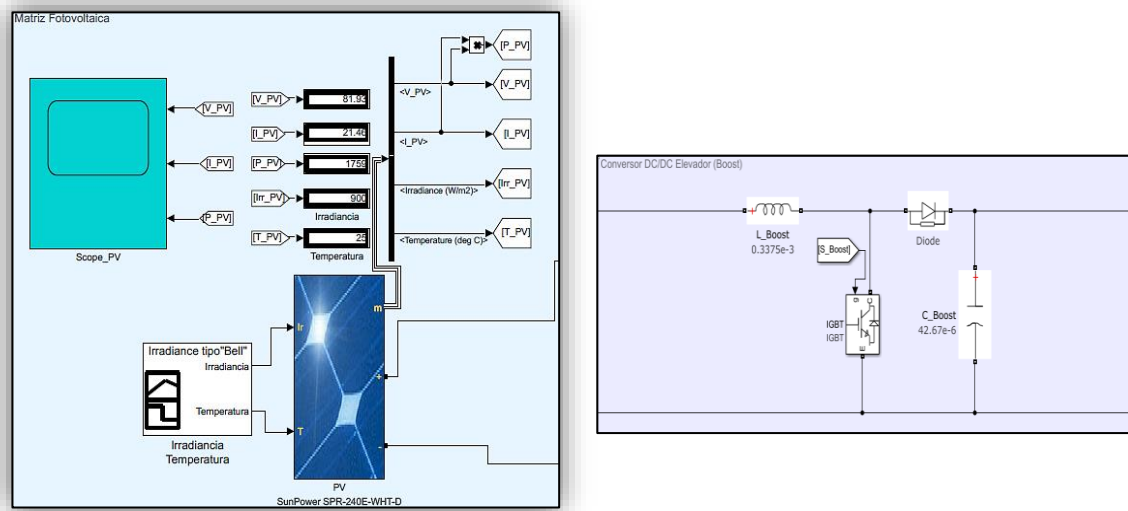


Fig. 33 Esquema del sistema FV, baterías, Supercapacitor  
Fuente: Matlab-Simulink (Autor,2020).

### 3.2 Simulación de la matriz fotovoltaica.

La figura 34 representa la matriz fotovoltaica diseñada en el software Matlab-Simulink. la librería “Simscape/SimPowerSystems/SpecializedTechnology.” Se muestra el bloque “PV Array”, que corresponde a un a matriz fotovoltaica y el bloque “Builder signal” que corresponde a un generador de señales. El convertidor DC/DC elevador y Los ajustes de capacitancia e inductancia están acorde al diseño del capítulo II sección 2.2.2. El control del transistor IGBT se realiza mediante el algoritmo MPPT y el modulador de ancho de pulso (PWM). El transistor IGBT empelado para la simulación está configurado a una frecuencia de conmutación de



30 kHz, los terminales de salida del convertidor se conectan al enlace de corriente continua.

Fig. 34 Matriz fotovoltaica, convertor DC/DC elevador en Matlab-Simulink  
fuente: Matlab-Simulink (Autor,2020).

Los datos se ingresan de acuerdo con el diseño del anterior capítulo la figura 35 muestra cada parámetro que se ingresa en el PV array, en la figura 36 se muestra la curva de la temperatura en 25 °C y la irradiancia que se considera como una curva de promedio diario específica de la zona.

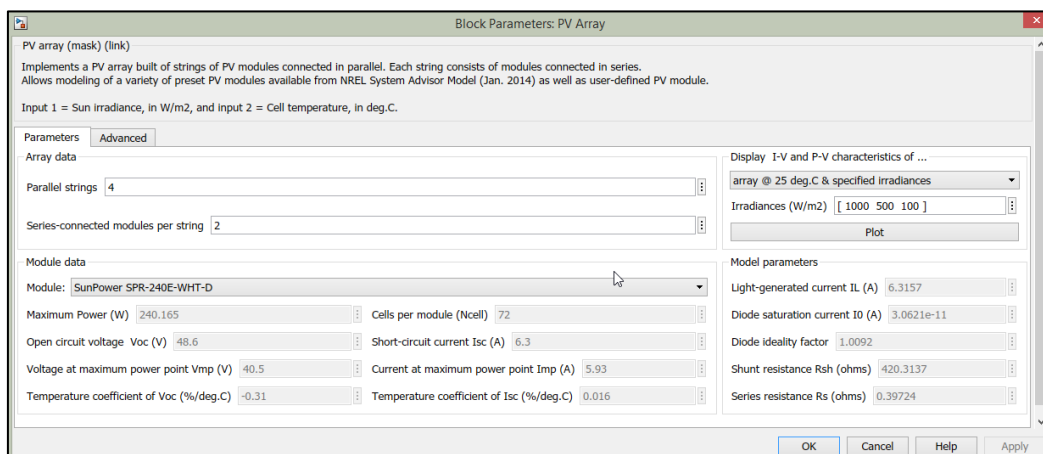


Fig. 35 Parámetros PV Array

Fuente: Matlab-Simulink (Autor,2020).

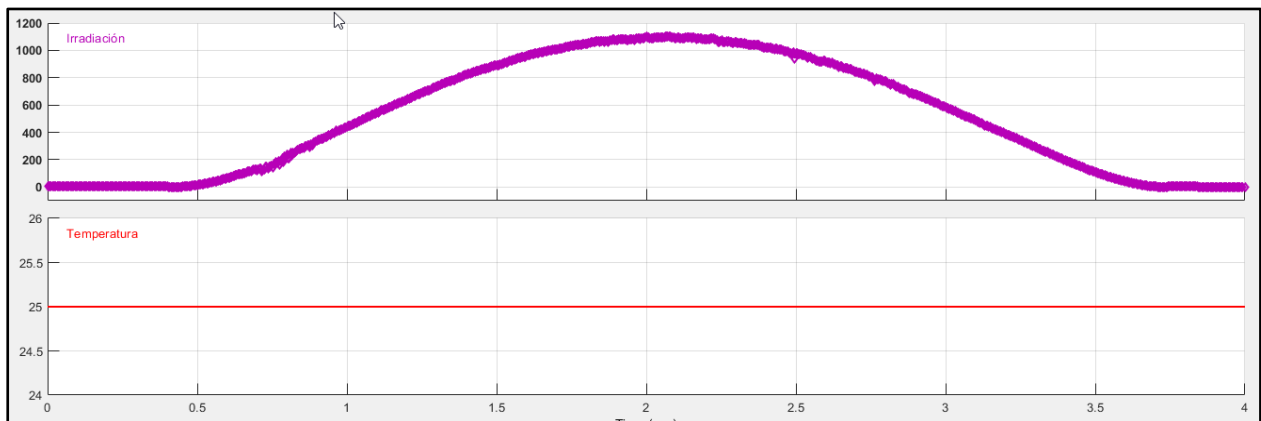


Fig. 36 Irradiación y temperatura de la matriz fotovoltaica  
Fuente: Matlab Simulink (Autor 2020).

La figura 37 muestra las curvas de corriente ( $I$ ) y voltaje ( $V$ ), potencia ( $P$ ) y voltaje ( $V$ ), necesaria para obtener los valores de la maima potencia del panel con una irradiación de  $1000 \text{ W/m}^2$  y una temperatura de  $25^\circ\text{C}$ . Los resultados obtenidos corresponden a la matriz fotovoltaica con paneles fotovoltaicos SunPower SPR-240E-WHT-D.

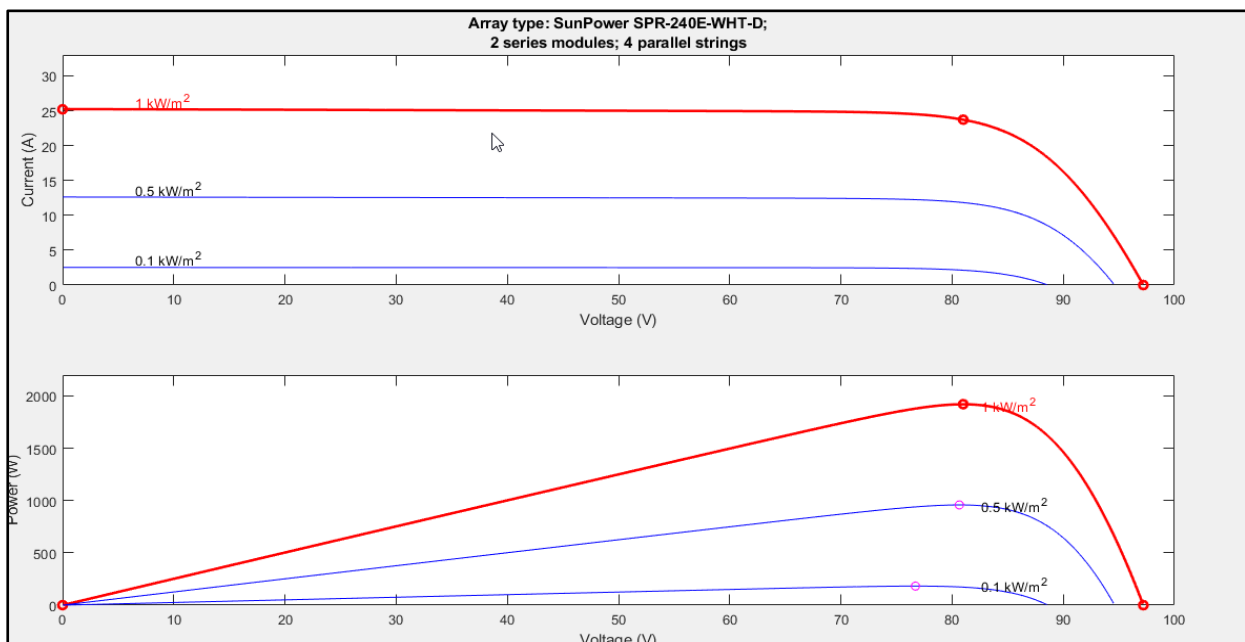


Fig. 37 Curvas I-V y P-V de la matriz fotovoltaica  
Fuente: Matlab Simulink (Autor 2020).

La corriente, potencia y voltaje son:

$$V_{mp} = 81 \text{ V}. \quad I_{mp} = 23.72 \text{ A}. \quad P_{mp} = 1921 \text{ W}.$$

### 3.2.1 Técnica del control MPPT.

Para optimizar el funcionamiento de una fuente fotovoltaica es importante extraer la potencia máxima mediante un MPPT. La estructura de bloques Figura 38 representa las estradas de voltaje y corriente de la matriz fotovoltaica, un bloque que representa la función para el MPPT

y un generador (PWM) el cual actúa y determina directamente en el ciclo de trabajo del convertidor.

La función recibe los valores de corriente y voltaje del panel, así como también los parámetros de incremento y decremento, el ciclo de trabajo a la salida estar comprendido entre los valores 0 a 1.

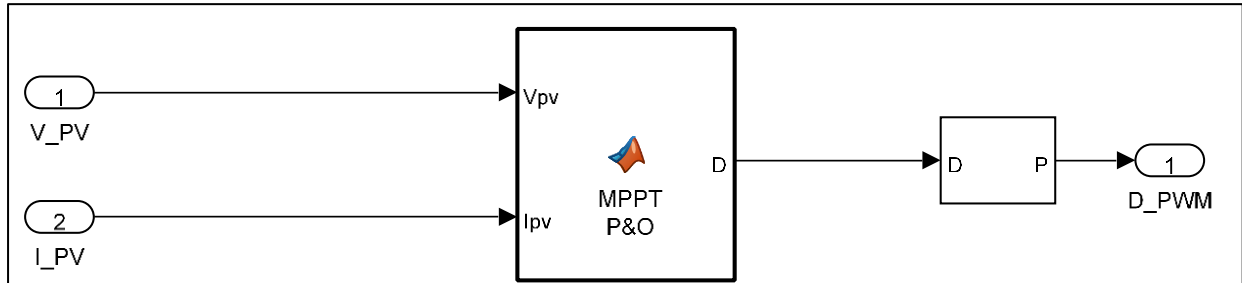


Fig. 38 MPPT (Perturbar y Observar)  
Fuente: Matlab- Simulink (Autor,2020).

La técnica MPPT perturbar y observar se desarrolla siguiendo el diagrama de flujo del capítulo II sección 2.1.1 El algoritmo en lenguaje de programación se aprecia en el anexo A.

En la figura 39 se muestra una comparación en el tiempo entre la máxima potencia obtenida por el panel y la máxima potencia ideal obtenida por el trabajo del algoritmo, se evidencia que la potencia generada por la matriz fotovoltaica es capaz de seguir a la potencia ideal, las variaciones de irradiancia están comprendidas entre  $100 \text{ W/m}^2$ ,  $500 \text{ W/m}^2$ ,  $1000 \text{ W/m}^2$ .

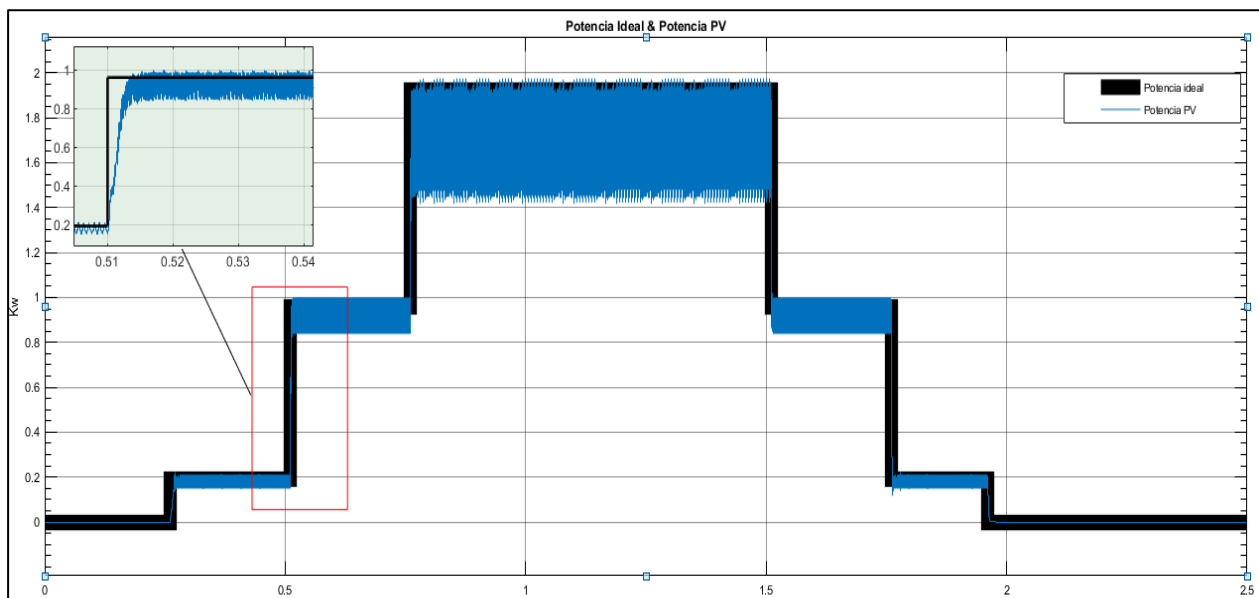


Fig. 39 Potencia ideal en comparación con la potencia de la matriz fotovoltaica.  
Fuente: Matlab Simulink (Autor,2020).

En la figura 40, logramos evidenciar la eficiencia del algoritmo P&O esta comprendida entre un rango 95% a 98% para una potencia fotovoltaica basada en una irradiancia con un curva tipo bell que va desde  $0 - 1921 \text{ W}$ .

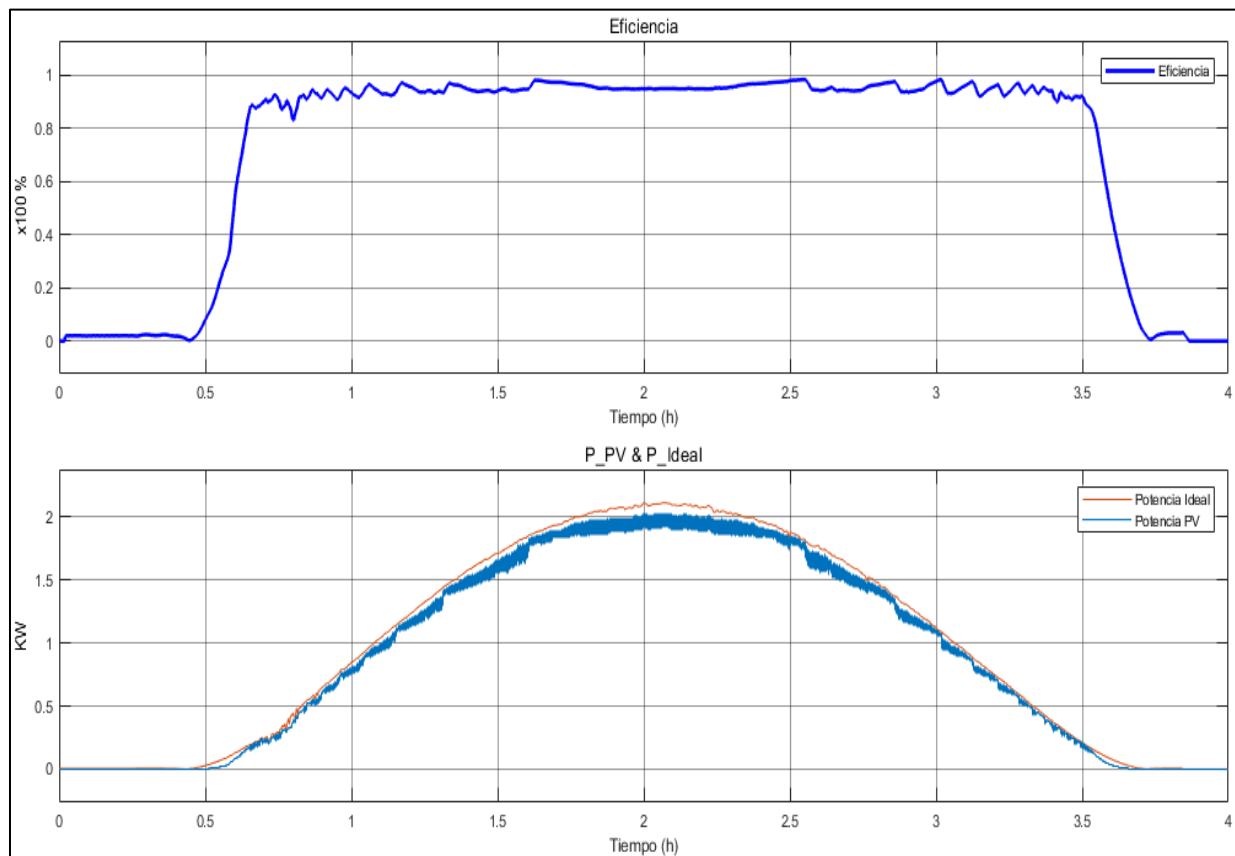


Fig. 40 Eficiencia del algoritmo P&O, Potencia de la matriz fotovoltaica.  
Fuente: Matlab Simulink (Autor, 2020).

El voltaje de la matriz fotovoltaica se evidencia en la figura 41, el valor en el punto de máxima potencia de  $81 V_{mpp}$ , mientras que el voltaje a la salida del conversor DC/DC se muestra en la figura 42 y se encuentra en 90 V.

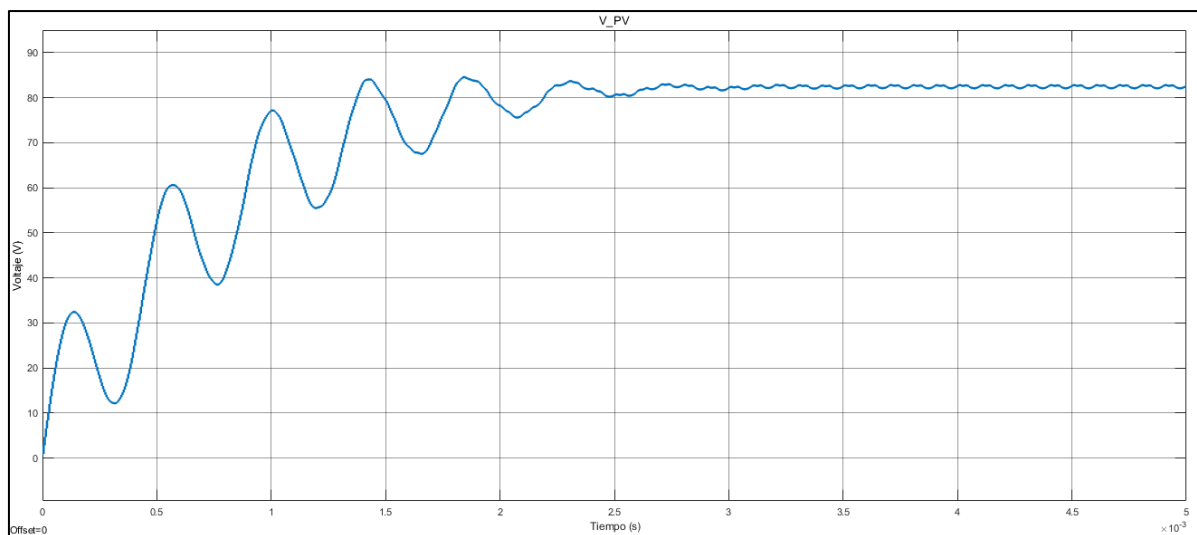


Fig. 41 Voltaje de la matriz fotovoltaica.  
Fuente: Matlab Simulink (Autor, 2020).

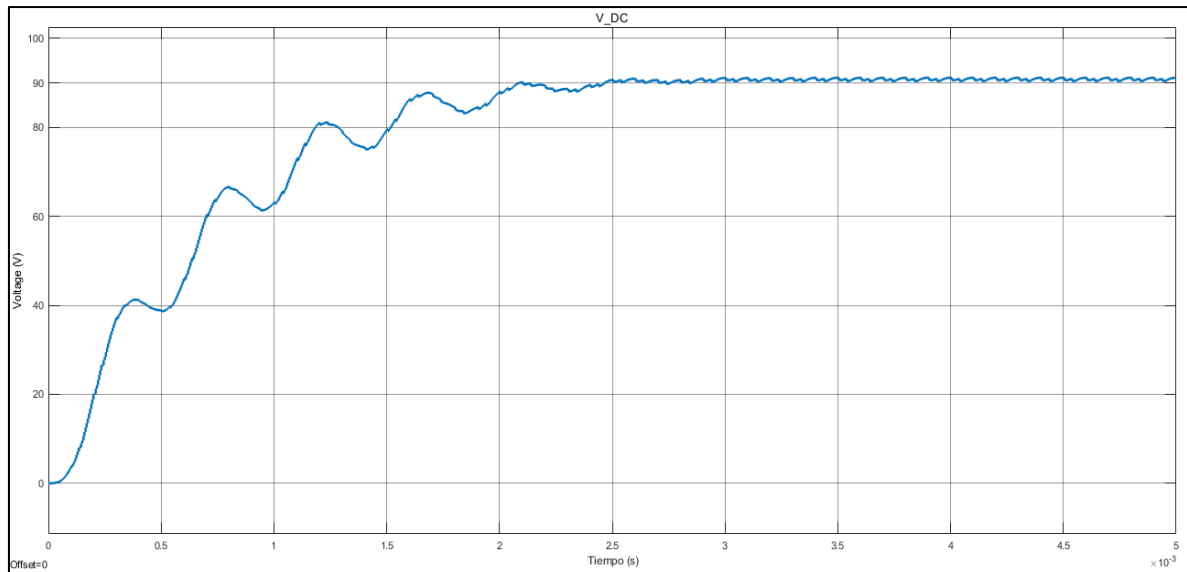


Fig. 42 Conversor DC/DC elevador  
Fuente: Matlab-Simulink (Autor,2020).

### 3.4 Banco de baterías.

En la figura 43 se muestra el modelo de la batería ion litio implementada en Simulink. El modelo se implementó de acuerdo con los ajustes de diseño del capítulo II el modelo de la batería los encontramos en la librería Simscape/SimPowerSystems/Specialized Technology/ElectricDrives/ExtraSources de Simulink.

El banco de baterías contiene 6 baterías la cuáles son modificables y se ajustan a una variedad de parámetros a partir de los cuales depende el comportamiento de la misma, es importante que cada una de las baterías se ajustadas de la misma manera para una buena simulación.

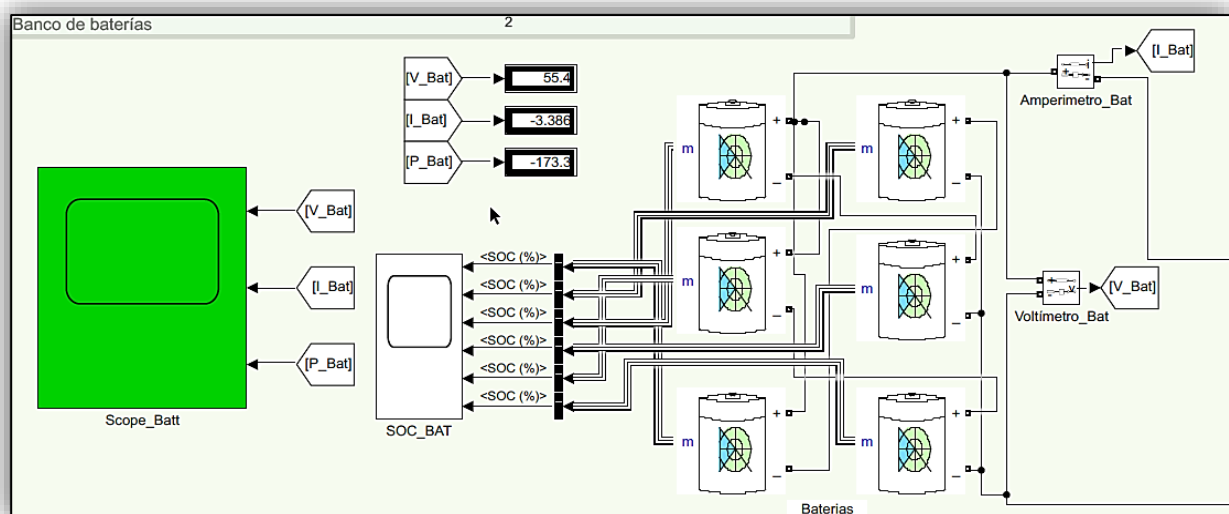


Fig. 43 Banco de Baterías  
Fuente: Matlab Simulink.

En la figura 44 se muestra la pestaña de parámetros que contiene cada batería y la configuración que se aplica para la simulación de esta.

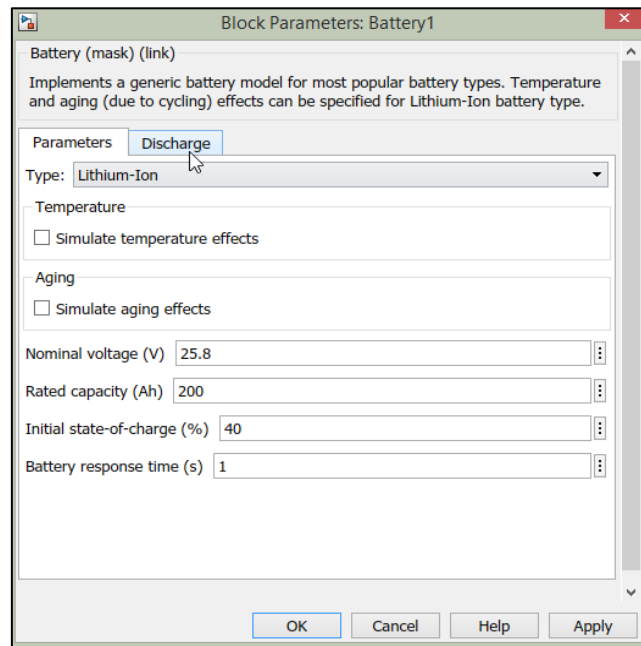


Fig. 44 Parámetros de cada batería.  
Fuente: Matlab Simulink (Autor,2020).

### 3.5 Banco de supercapacitores.

El modelo implementado del supercapacitor se muestra en la figura 45 es un modelo muy completo, en la pestaña de parámetros, figura 46 se configuran cada uno de los parámetros que son la capacidad nominal, voltaje nominal, resistencia, capacitores en serie y paralelo el voltaje inicial y la temperatura.

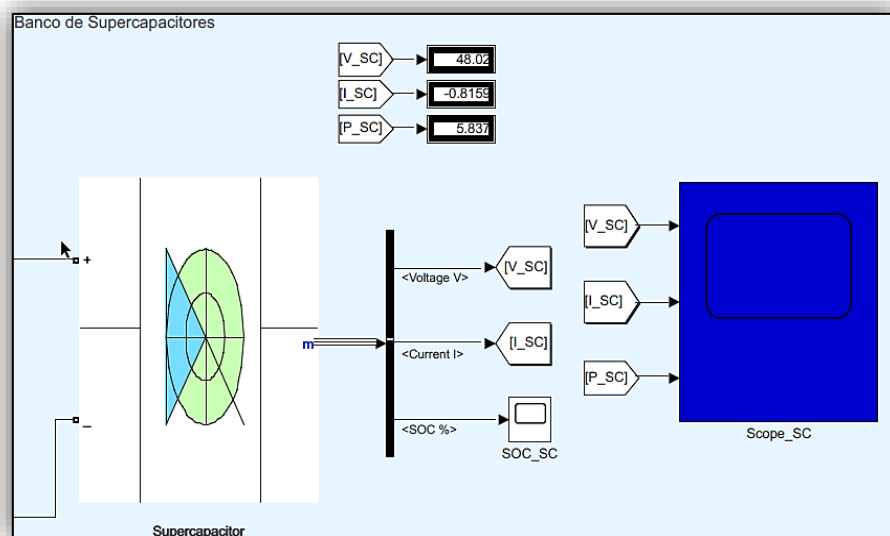


Fig. 45 Banco de supercapacitores.  
Fuente: Matlab Simulink (Autor,2020).

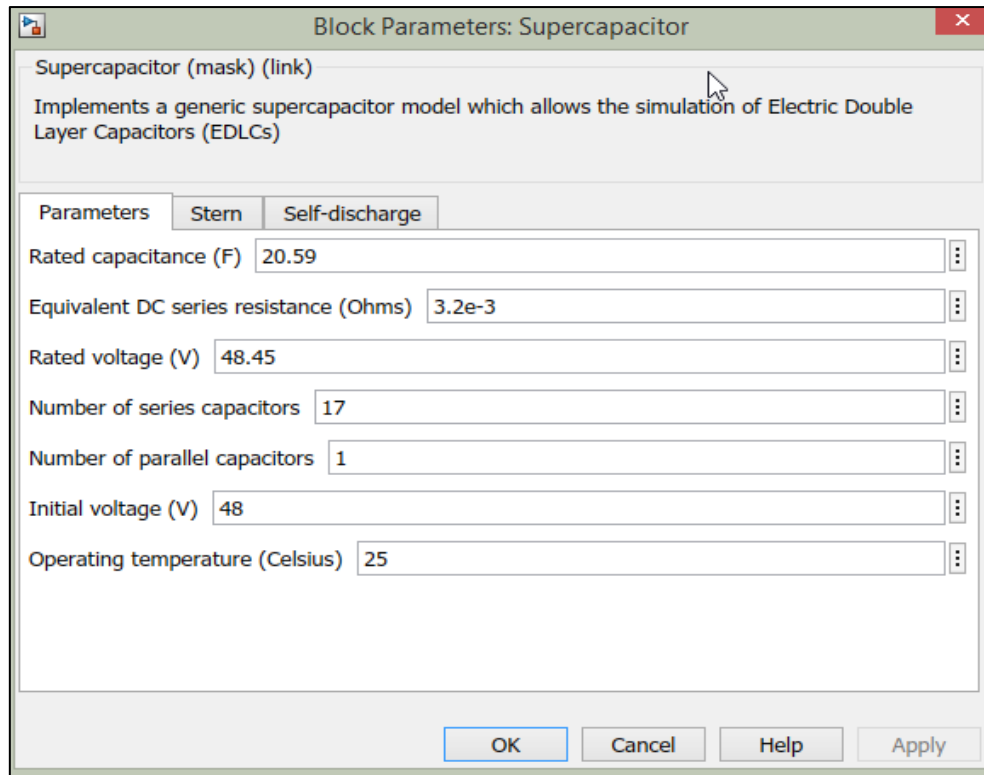


Fig. 46 Parámetros del Banco de supercapacitores  
Fuente: Matlab Simulink (Autor,2020).

### 3.6 Diseño del controlador de los convertidores DC/DC tipo C Bidireccionales.

Los convertidores DC/DC tipo C Bidireccionales implementados en la simulación para el banco de baterías y supercapacitores se muestran en la figura 47 para poder realizar las simulaciones es necesario un estudio matemático y conseguir un control correcto.

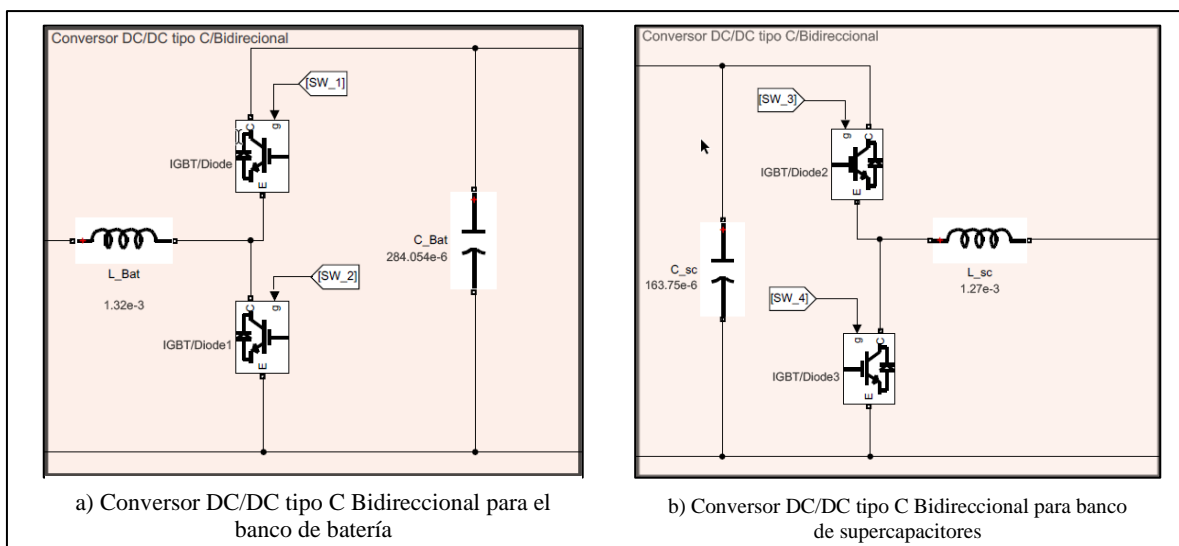


Fig. 47 convertidores DC/DC tipo C bidireccionales  
Fuente: Matlab-Simulink (Autor,2020).



Un convertidor en general trabaja con los interruptores y dependiendo si están abiertos o cerrados, puede presentarse los siguientes casos, figura 48 muestra el estado cuando S1 no conduce y S2 conduce.

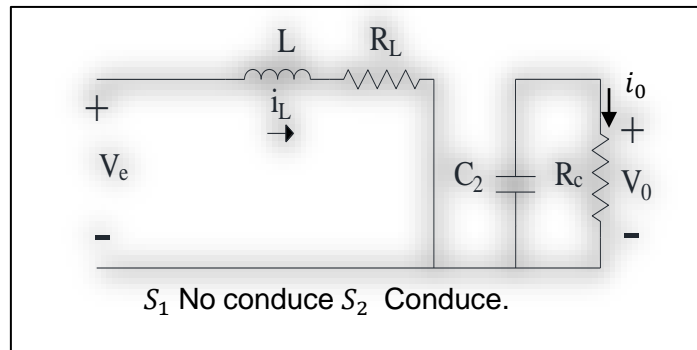


Fig. 48 Conversor DC/DC Bidireccional S1 No conduce S2 conduce.  
Fuente: (Autor,2020).

En este estado las ecuaciones de Kirchhoff para voltajes del primer circuito cerrado y corrientes en el segundo circuito cerrado se muestran a continuación.

$$\begin{cases} V_e(t) = L \frac{d}{dt} i(t) + R_L i(t) \\ C \frac{d}{dt} V_0(t) + i_0(t) = 0 \end{cases} \quad (36)$$

Formulando las anteriores ecuaciones en función de voltaje en el inductor y la corriente en el capacitor se obtiene las siguientes ecuaciones

$$\begin{cases} L \frac{d}{dt} i(t) = V_e(t) - R_L i(t) \\ C \frac{d}{dt} V_0(t) = i_0(t) \end{cases} \quad (37)$$

Cuando S1 conduce y S2 no conduce se obtiene el circuito mostrando en la figura 49.

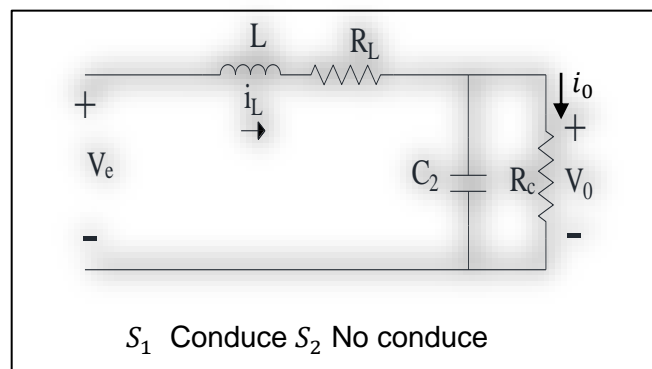


Fig. 49 Conversor bidireccional S1 conduce S2 no conduce.  
Fuente: (Autor,2020)

Las ecuaciones de Kirchhoff para este segundo circuito son la siguientes.

$$\begin{cases} V_e(t) = L \frac{d}{dt} i(t) + R_L i(t) + V_0(t) \\ i(t) = C \frac{d}{dt} V_0(t) + i_0(t) \end{cases} \quad (38)$$

Nuevamente las ecuaciones anteriores en función del voltaje en el inductor y la corriente en el capacitor se obtienen las siguientes ecuaciones.

$$\begin{cases} L \frac{d}{dt} i(t) = V_e(t) - R_L i(t) - V_0(t) \\ C \frac{d}{dt} V_0(t) + i_0(t) = 0 \end{cases} \quad (39)$$

El sistema se comporta de una forma no lineal por lo que es necesario linealizar el sistema y después de aplicar transformada de Laplace, obteniendo la función de transferencia del convertor DC/DC de la batería y el del supercapacitor queda de la siguiente manera.

Para los controladores es necesario un PI ya que es suficiente para cumplir las especificaciones de diseño y el proceso de compensación.

#### a) Función de transferencia Batería.

El diagrama de la figura 50 representa el lazo control de corriente del banco de baterías.

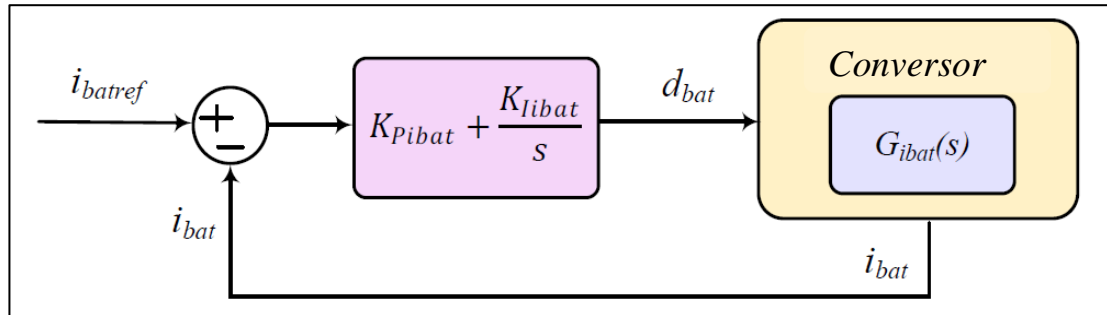


Fig. 50 Bucle de control de corriente de la batería  
Fuente: (Jamshidpour, 2018).

$$G_{id,Bat} = \frac{\hat{I}_{Bat}}{\hat{d}_{Bat}} = \frac{V_{DC}Cs + 2\frac{V_{DC}}{R}}{L_{bat}Cs^2 + \frac{L_{bat}}{R}s + (1 - d_b)^2} \quad (40)$$

El resultado de la función de transferencia mediante el uso de la herramienta Matlab (anexo B) se visualiza en la ecuación 39.

$$G_{idbat} = \frac{0.02556s + 16.61}{3.75e^{-7}s^2 + 0.0001218s + 0.3249} \quad (41)$$

El resultado de los polos y ceros de la función de transferencia se muestra en la ecuación 42 y esta función tiene un cero a  $649.8 \text{ rad/s}$  y un polo doble a la raíz de  $8.664e^5 \text{ rad/s}$

$$Gidbat_{zpk} = \frac{68160 (s + 649.8)}{(s^2 + 324.8s + 8.664e^5)} \quad (42)$$

Por lo tanto como el polo doble y el cero están muy cerca vamos a eliminar el cero con uno del polo doble y la función aproximada queda de la siguiente manera:

$$Gidbat_{apox} = \frac{68160}{(s + \sqrt{8.664e^5})} \quad (43)$$

En la figura 51 se grafica el diagrama de bode de la función de transferencia real representada por la línea roja, y la función de transferencia aproximada representada por la línea azul.

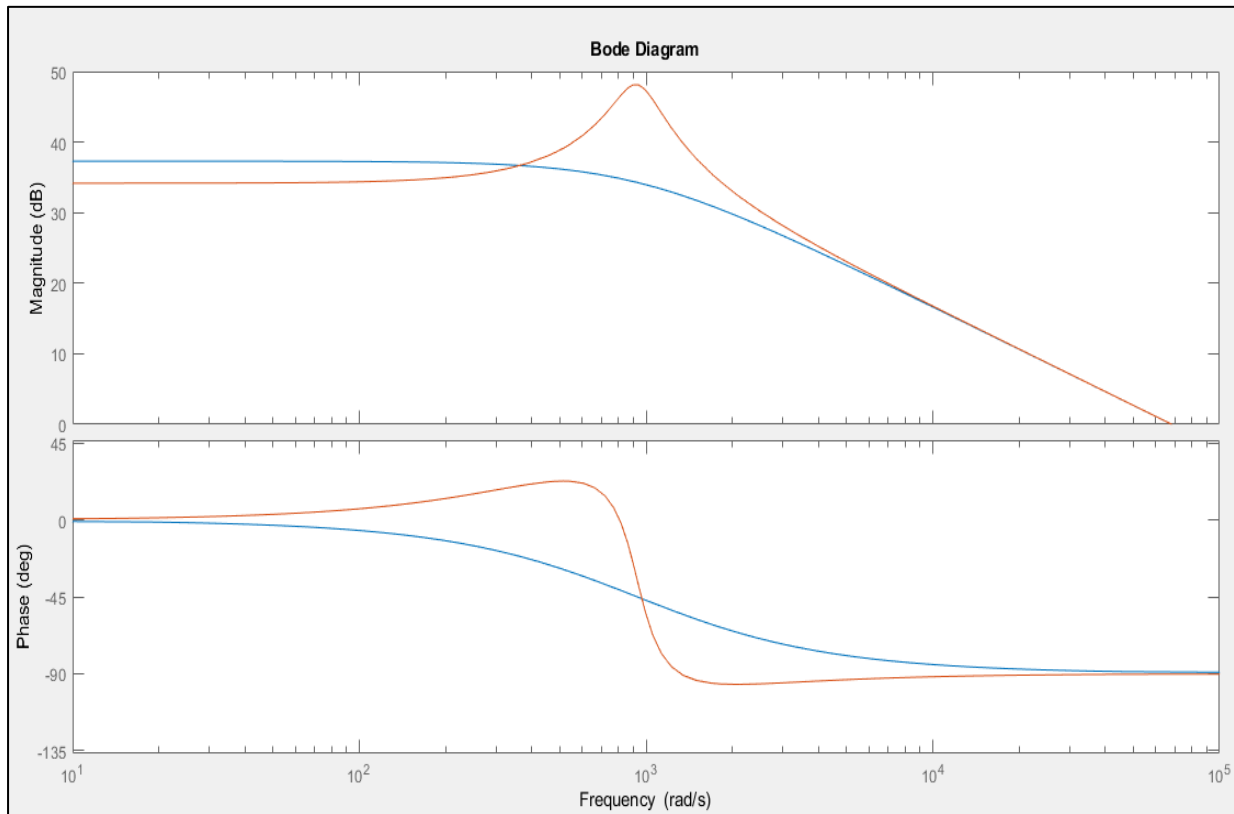


Fig. 51 Diagrama de bode función de transferencia vs función de transferencia aproximada.  
Fuente: (Autor,2020).

Diseñando el controlador para que la función de transferencia del lazo abierto de la planta aproximada tenga un ancho de banda de 60 Hz. En la figura 52 la línea roja es la función de transferencia del controlador con la función aproximada y la línea azul es la función de transferencia de la planta linealizada, ambos comparten un ancho de banda a 0 dB de 60Hz.

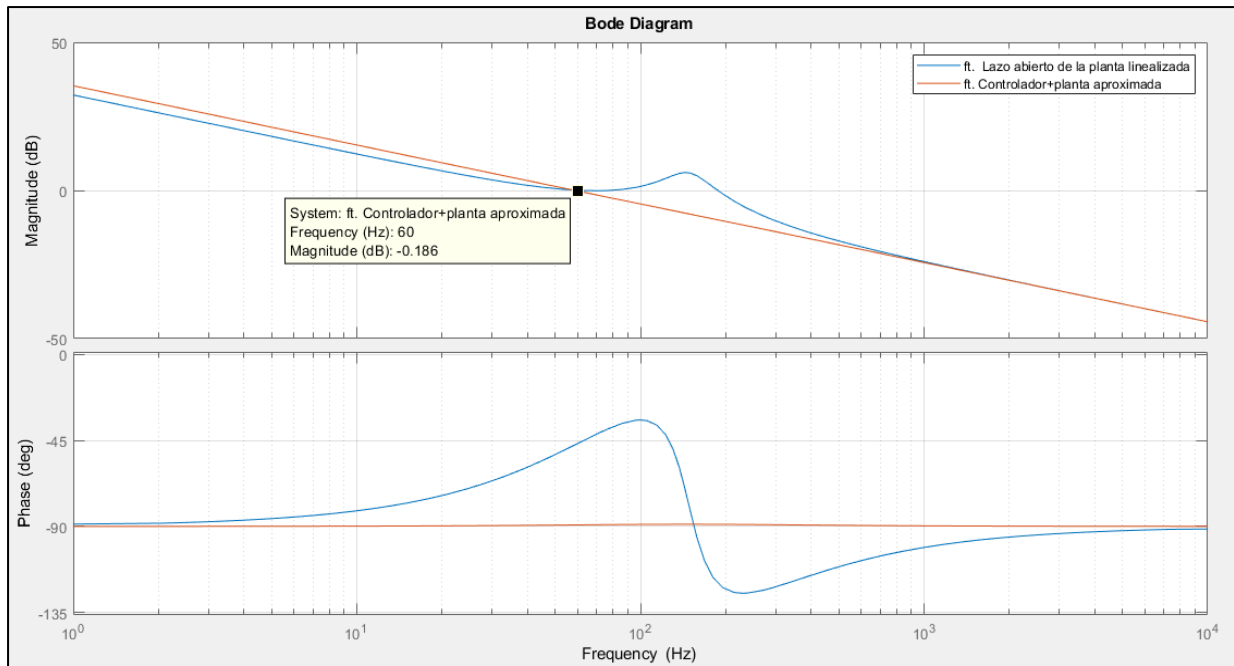


Fig. 52 Diagrama de bode para el diseño de controlador PI de lazo de control del banco de baterías.  
Fuente: (Autor,2020).

En la figura 53 se observa el tiempo de respuesta del sistema, de acuerdo con el error entre la corriente de referencia y la corriente de la batería, representado en el diagrama de bloques de la figura 50 y se mencionan las constantes del controlador que se aplica en el control de corriente del circuito de la figura 62.

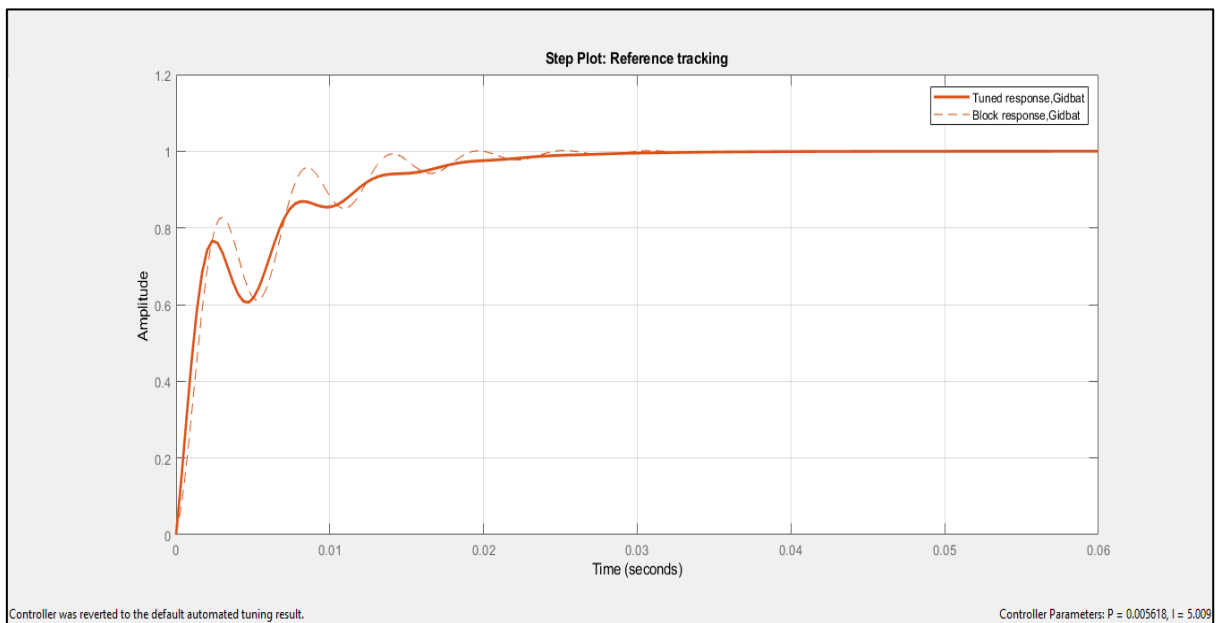


Fig. 53 Respuesta para el control PI lazo de control de la batería.  
Fuente: Matlab Simulink (Autor,2020).

Las constantes del diseño son las siguientes:

$$K_p = 0.0056 \quad K_i = 5.009$$

### c) Función de transferencia Supercapacitor

El diagrama de la figura 54 representa el control de corriente del supercapacitor.

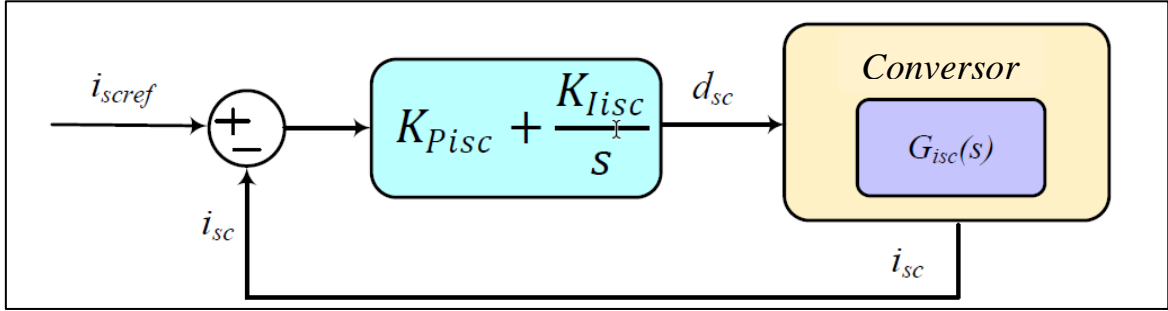


Fig. 54 Bucle de control de corriente del supercapacitor  
Fuente: (Autor,2020).

Función de transferencia del lazo de control dl supercapacitor. (Punna & Manthati, 2020)

$$G_{id,sc} = \frac{\hat{i}_{sc}}{\hat{d}_{sc}} = \frac{V_{DC}Cs + 2\frac{V_{DC}}{R}}{L_{SC}Cs^2 + \frac{L_{SC}}{R}s + (1 - d_{SC})^2} \quad (44)$$

$$G_{idsc} = \frac{0.007934 s + 8.939}{2.08e - 07 s^2 + 0.0001172 s + 0.2894} \quad (45)$$

El resultado de los polos y ceros de la función de transferencia se muestra en la ecuación 42 y esta función tiene un cero a  $38144 \text{ rad/s}$  y un polo doble a la raíz de  $1.391e^6 \text{ rad/s}$

$$G_{idsc_{zpk}} = \frac{38144 (s + 1127)}{(s^2 + 563.5s + 1.391e^6)} \quad (46)$$

Por lo tanto como el polo doble y el cero están muy cerca vamos a eliminar el cero con uno del polo doble y la función aproximada queda de la siguiente manera.

$$G_{idsc_{apox}} = \frac{38144}{(s + \sqrt{1.391e^6})} \quad (47)$$

En la figura 55 se grafica el diagrama de bode de la función de transferencia real representada por la línea roja, y la función de transferencia aproximada representada por la línea azul.

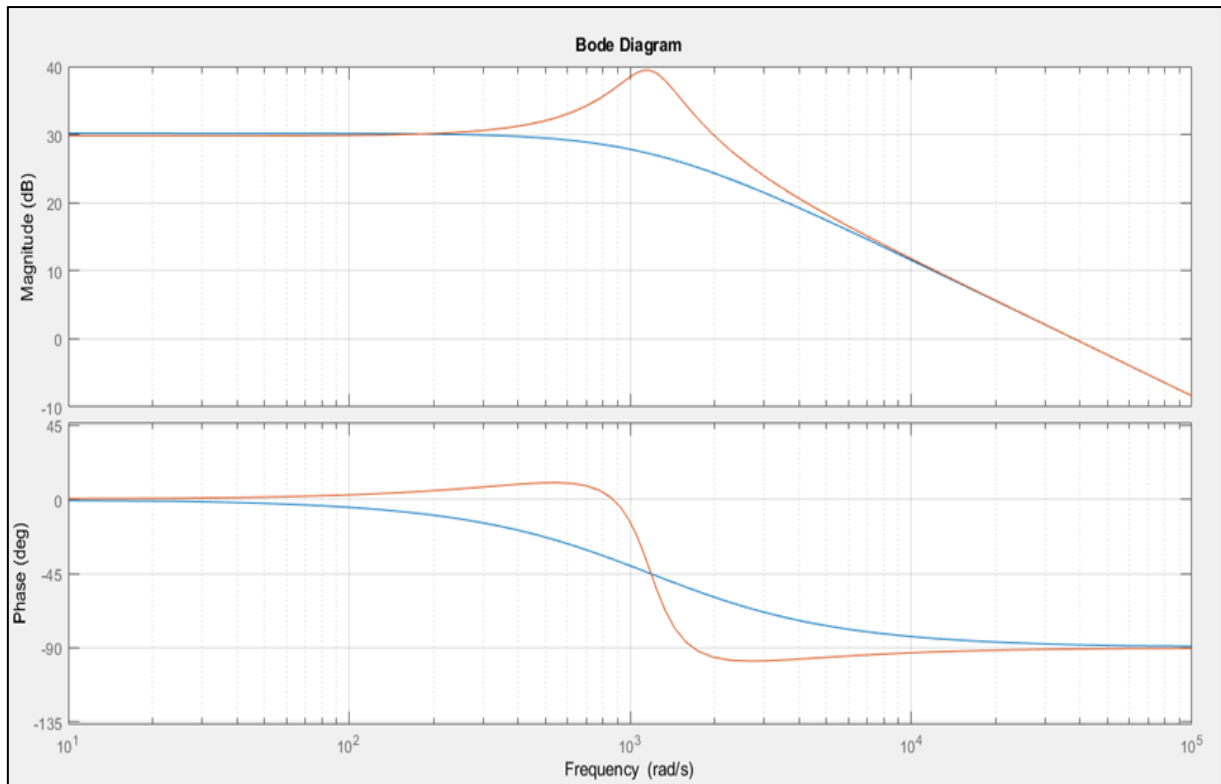


Fig. 55 Diagrama de bode de la función de transferencia real vs la función aproximada.  
Fuente: (Autor,2020).

Diseñando el controlador para que la función de transferencia del lazo abierto de la planta aproximada tenga un ancho de banda de 60 Hz. En la figura 56 la línea roja es la función de transferencia del controlador con la función aproximada y la línea azul es la función de transferencia de la planta linealizada, ambos comparten un ancho de banda a 0 dB de 61.3Hz.

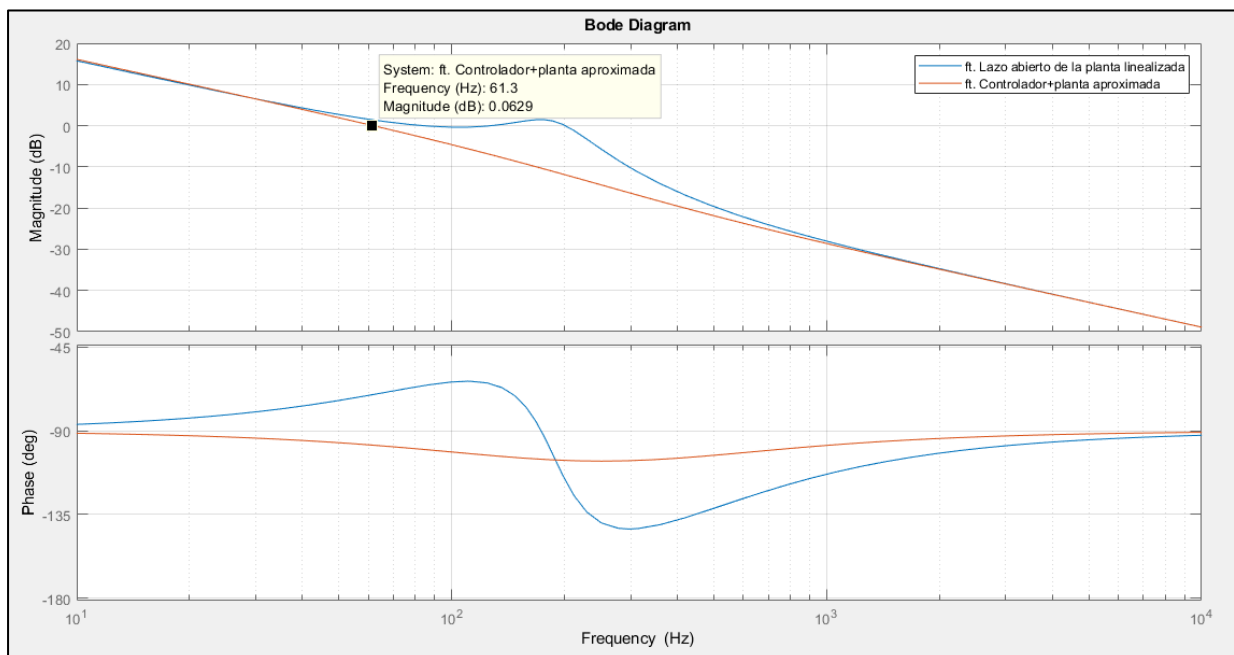


Fig. 56 Diagrama de bode función de transferencia vs función de transferencia aproximada.  
Fuente: (Autor,2020).

En la figura 57 se muestra la respuesta del sistema que tiene una respuesta de 0.02 segundos de estabilización., de acuerdo con el error entre la corriente de referencia y la corriente del banco de supercapacitores, representado en el diagrama de bloques de la figura 54 y se menciona las constantes del controlador que se aplica en el control de corriente de los supercapacitores del circuito de la figura 62.

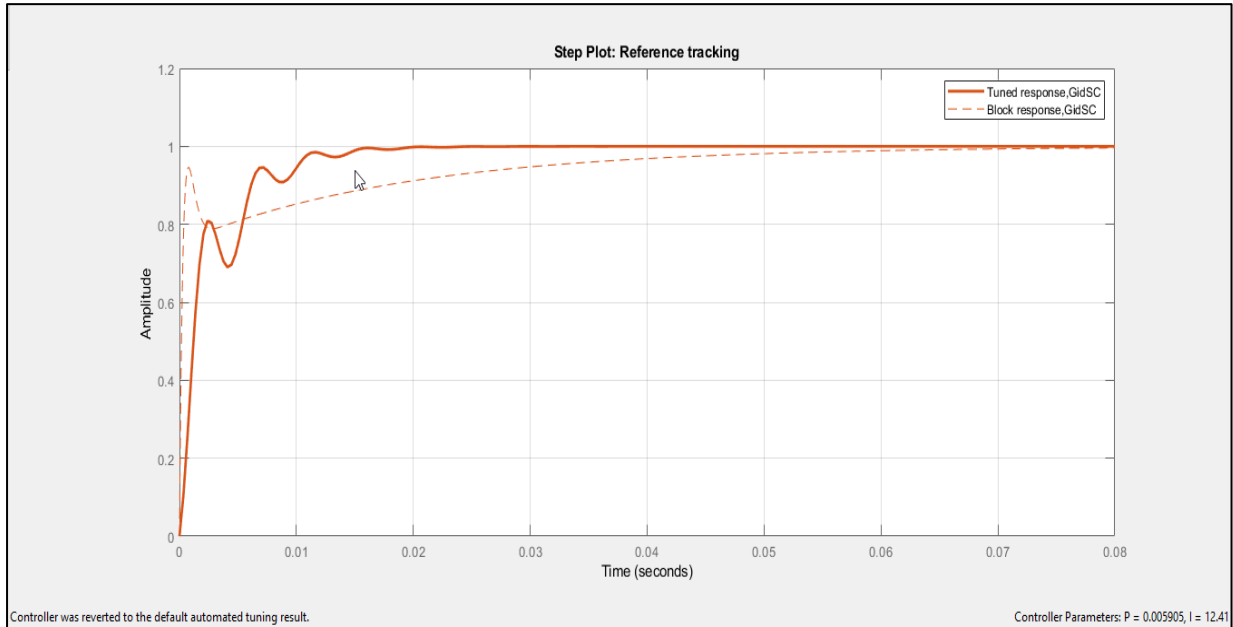


Fig. 57 Respuesta Pi para el control del supercapacitor  
Fuente: Matlab Simulink, (Autor,2020).

Las constantes de diseño son:

$$Kp = 0.005905 \quad Ki = 12.41$$

#### d) Control del sistema híbrido baterías y supercapacitores

En la figura 58 se muestra el diagrama de bloques lazo de control de voltaje

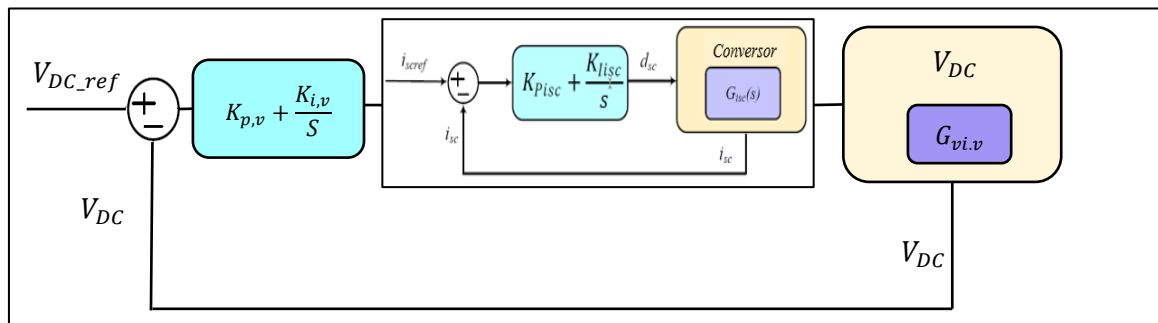


Fig. 58 Bloque de diagramas de control de voltaje SC.  
Fuente: Matlab Simulink (Autor,2020).

La función de transferencia para el control de voltaje se obtiene mediante la ecuación 42 en base a la referencia (Punna & Manthathi, 2020)

$$G_{vi,v} = \frac{\hat{V}_{DC}}{\hat{I}_{SC}} = \frac{R(1 - d_{SC}) \cdot \left(1 - \frac{L_{SC}}{R(1 - d_{SC})^2} s\right)}{2 + RCs} \quad (48)$$

$$G_{vi,v} = \frac{-0.002396 s + 5.745}{0.001775 s + 2} \quad (49)$$

Función de transferencia con respecto a polos y ceros.

$$G_{vi,v_{zpk}} = \frac{381.7 s (s + 894.5) (s + 649.8) (s^2 + 324.8s + 8.664e^{05})}{s (s + 162.2) (s^2 + 324.8s + 8.664e^{05}) (s^2 + 544.3s + 1.368e^{06})} \quad (50)$$

Función de transferencia de lazo de control de la ecuación 43 ( $G_{idsc_{aprox}}$ ) multiplicada por función de transferencia para el control de voltaje ( $G_{vi,v}$ ). Resulta la función de transferencia de la planta sin el controlador ecuación 51.

$$G_{vi,v} = \frac{-515.24 (s - 2398) (s + 894.5) (s + 649.8)}{(s + 1127) (s + 162.2) (s^2 + 544.3s + 1.368e^{06})} \quad (51)$$

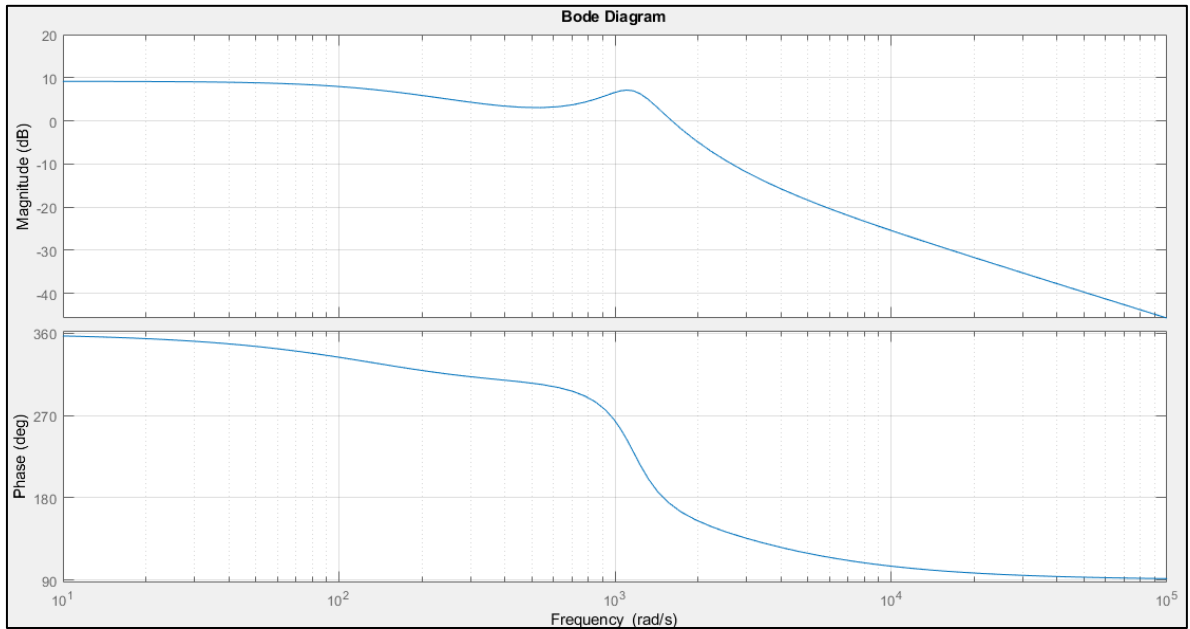


Fig. 59 Diagrama de bode de la fusión de transferencia de lazo de control de la corriente multiplicada por la de lazo de control del voltaje.  
Fuente:(Autor,2020).

La función de transferencia de la ecuación debido a la complejidad y ya que es una función no lineal, se la aproxima a una función de primer orden como se muestra en la figura 60. Y para



asegurarnos que el controlador va a funcionar vamos a tener un ancho de banda excesivamente lento.

$$G_{vi,v_{aprox}} = \frac{381.7 s^2 + 5.895e^{05} s + 2.219e^{08}}{s^3 + 706.5 s^2 + 1.456e^{06} s + 2.219e^{08}} \quad (52)$$

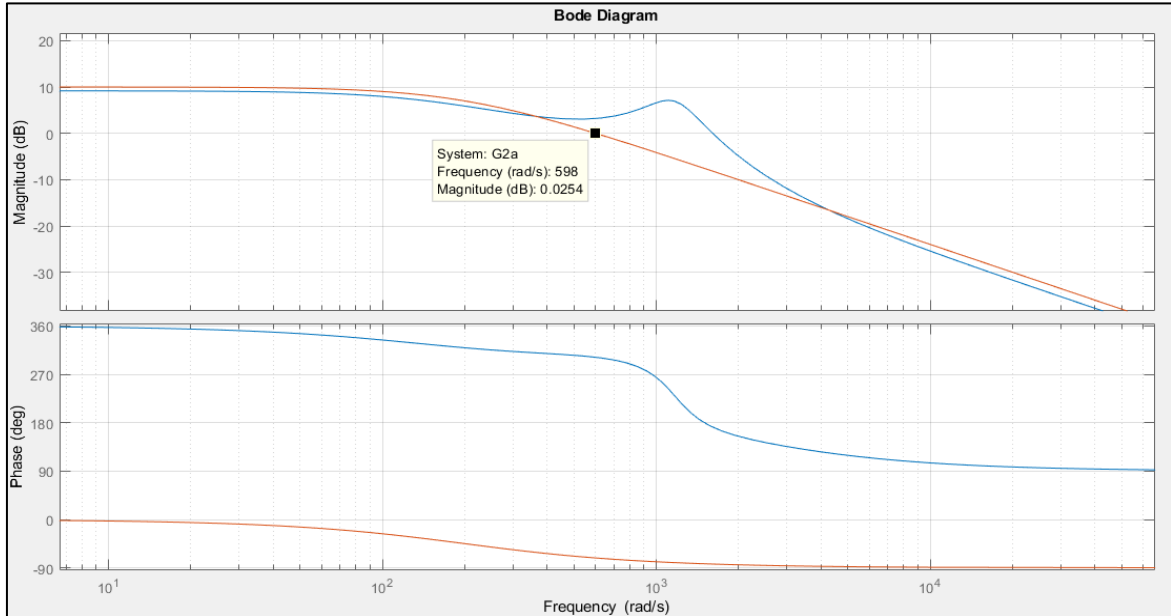


Fig. 60 Diagrama de bode funciones de transferencia del sistema híbrido.

Fuente: (Autor,2020).

En la figura 61 se muestra la respuesta del sistema y el cual se estabiliza en 0.010 segundos. de acuerdo con el error entre el voltaje de referencia y el voltaje de la carga, representado en el diagrama de bloques de la figura 58 y se menciona las constantes del controlador que se aplica en el control de corriente de los supercapacitores del circuito de la figura 62.

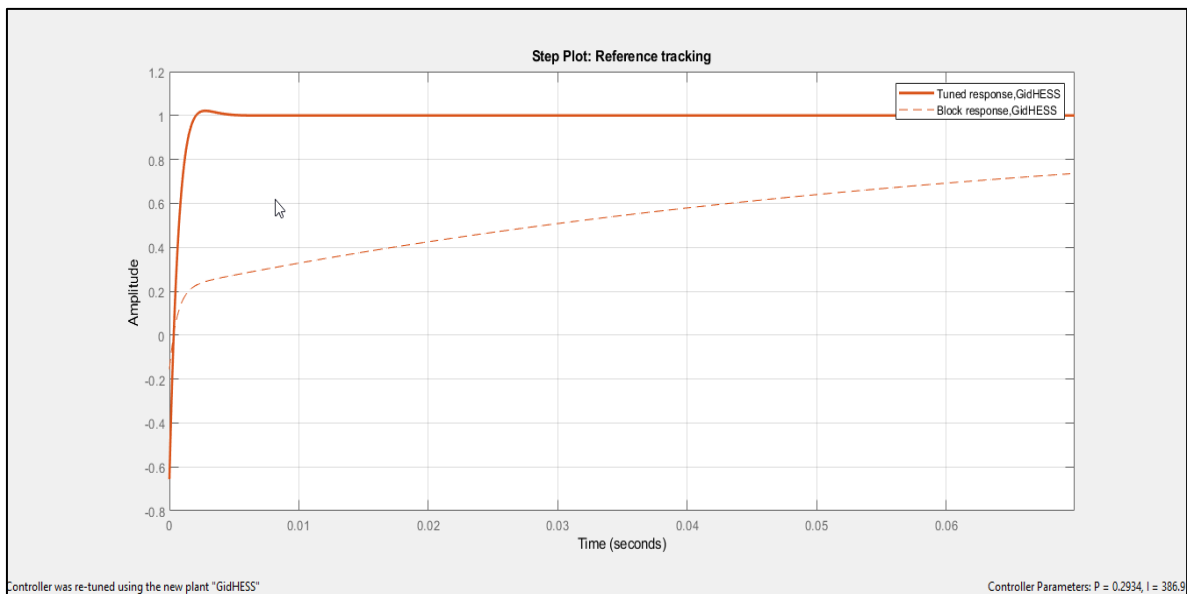


Fig. 61 Respuesta para el controlador del sistema HESS.

Fuente: Matlab Simulink (Autor,2020).

Las constantes del diseño son:

$$Kp = 0.2934 \quad Ki = 386.9$$

El diseño de la literatura de c propone el diagrama de bloques de control de gestión de energía a través de los convertidores DC/DC bidireccionales y se muestra en la figura 62.

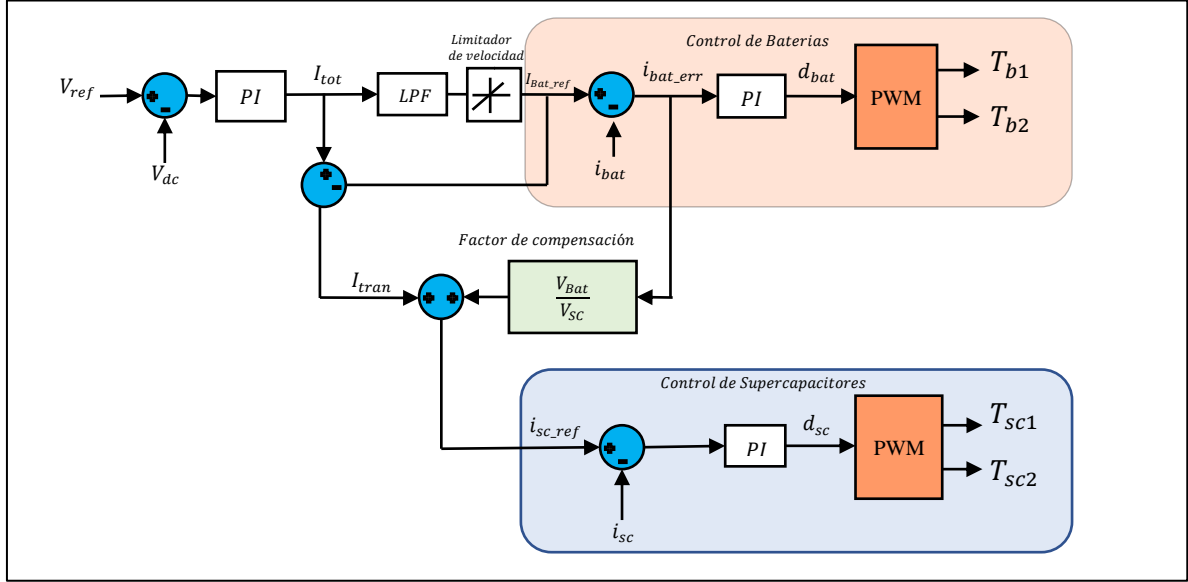


Fig. 62 Control de gestión de energía para los convertidores DC/DC Bidireccionales.  
Fuente: (Punna & Manthati, 2020).

El diagrama inicia con un controlador proporcional integral (PI) de el voltaje DC de referencia ( $V_{DC\_ref}$ ) y el voltaje real de salida ( $V_{DC}$ ), El controlador origina la corriente de referencia total ( $I_{tot}$ ) que se necesita y reduce la diferencia de voltajes. Se introduce un limitador, para la carga y descarga de corriente de la batería, la diferencia de la referencia de la señal actual a la salida del limitador y la corriente real de la batería se da al controlador (PI) el controlador genera la señal de control ( $D_{bat}$ ) para restar la diferencia en las corrientes. Los pulsos modulados por ancho de pulso (PWM) se introducen a los interruptores del convertor bidireccional de la batería.

El Convertor DC/DC Bidireccional debido a la inercia eléctrica y la dinámica lenta del sistema de baterías, el convertor no puede seguir rápidamente con la corriente de referencia de la batería ( $I_{Bat\_Ref}$ ), por lo tanto, la potencia no compensada de la batería se da por un componente transitorio de la corriente ( $I_{tran}$ ).

$$I_{tran} = I_{tot} - I_{bat\_ref} \quad (53)$$

La potencia no compensada de la batería se utiliza para mejorar el rendimiento del supercapacitor, por lo tanto la corriente del supercapacitor se forma de la siguiente manera:

$$I_{sc\_ref} = I_{tran} + (I_{bat\_ref} - I_{Bat}) \cdot \frac{V_{bat}}{V_{sc}} \quad (54)$$

El error pasa al controlador después de que las referencias reales y la corriente del supercapacitor se contrasten entre sí. El error se minimiza cuando el controlador (*PI*) genera la señal de control (*D<sub>sc</sub>*) para generar los pulsos de (PWM) correspondientes a los interruptores de conversor bidireccional del supercapacitor.

$$I_{SC\_ref} = I_{tran} - I_{bat\_err} \cdot \frac{V_{bat}}{V_{sc}} \quad (55)$$

Donde la corriente de error de la batería  $I_{bat\_err}$  es la diferencia entre la real y la corriente de referencia.

$$I_{bat\_err} = I_{bat\_ref} - I_{bat} \quad (56)$$

El controlador implementado en simulink para los convertidores DC/DC se muestra en la figura 63. Es la forma representada en bloques de acuerdo con la planteada en la figura 62.

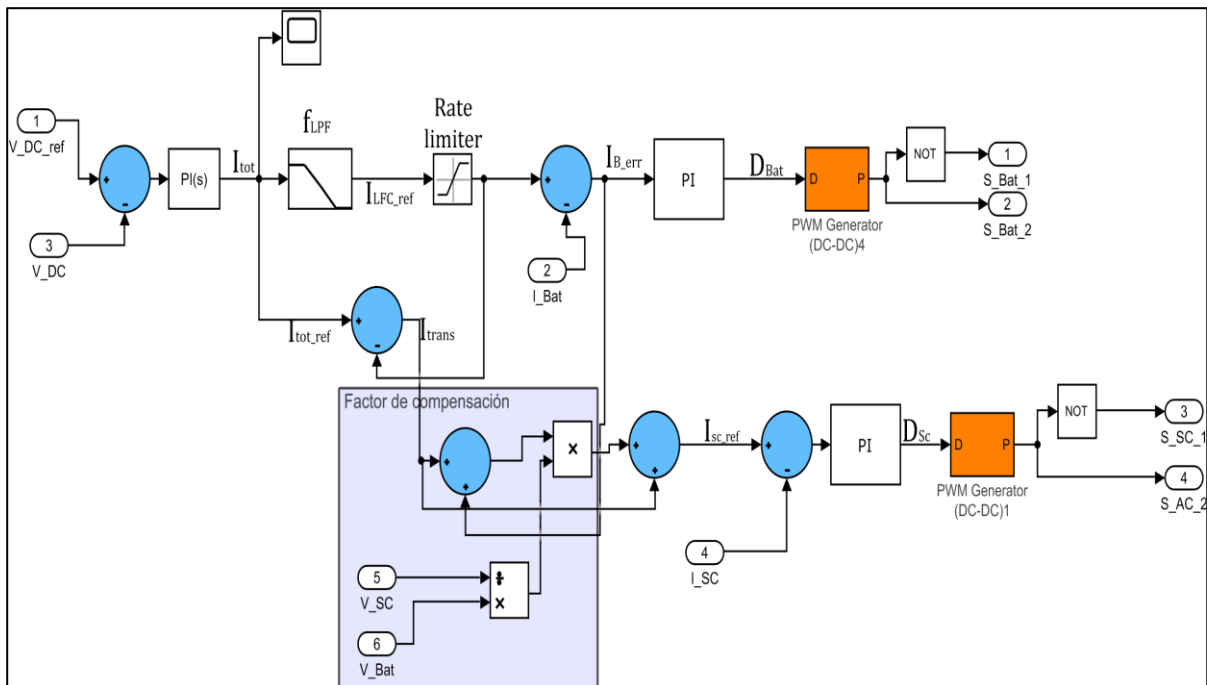


Fig. 63 control de los convertidores DC/DC bidireccionales  
Fuente: Matlab-Simulink (Autor,2020).

### 3.7 Evaluación y resultados.

La evaluación de controlador se evalúa en dos casos caso 1 cuando la generación fotovoltaica incrementa y disminuye y el caso 2 cuando la carga incrementa y disminuye. Los resultados muestran las curvas de voltaje, potencia, corriente demostrando el comportamiento del sistema.

#### 3.7.1 Caso 1. Variación en generación fotovoltaica.

La figura 64 muestra la variación escalonada de potencia de la matriz fotovoltaica la cual aumenta de 700 a 1921 Watios, el incremento perturba al voltaje DC lo que hace que

incremente 10 V y se estabilice en 0.12 milisegundos, la corriente tiende a bajar y quien asume la descarga de corriente es el supercapacitor y la batería paulatinamente asume esa descarga, la corriente del banco de baterías disminuye hasta el punto de carga, mientras la matriz fotovoltaica asume la corriente de la carga.

La variación de irradiancia es inestable la potencia de la matriz fotovoltaica vuelve a disminuir lo que reduce el voltaje de corriente continua DC, el control bidireccional de batería y supercapacitor asume la estabilización del voltaje a 90 V, la corriente que demanda la carga va a ser asumida por el supercapacitor mientras la corriente de la batería restablece y suministra la corriente que demanda la carga.

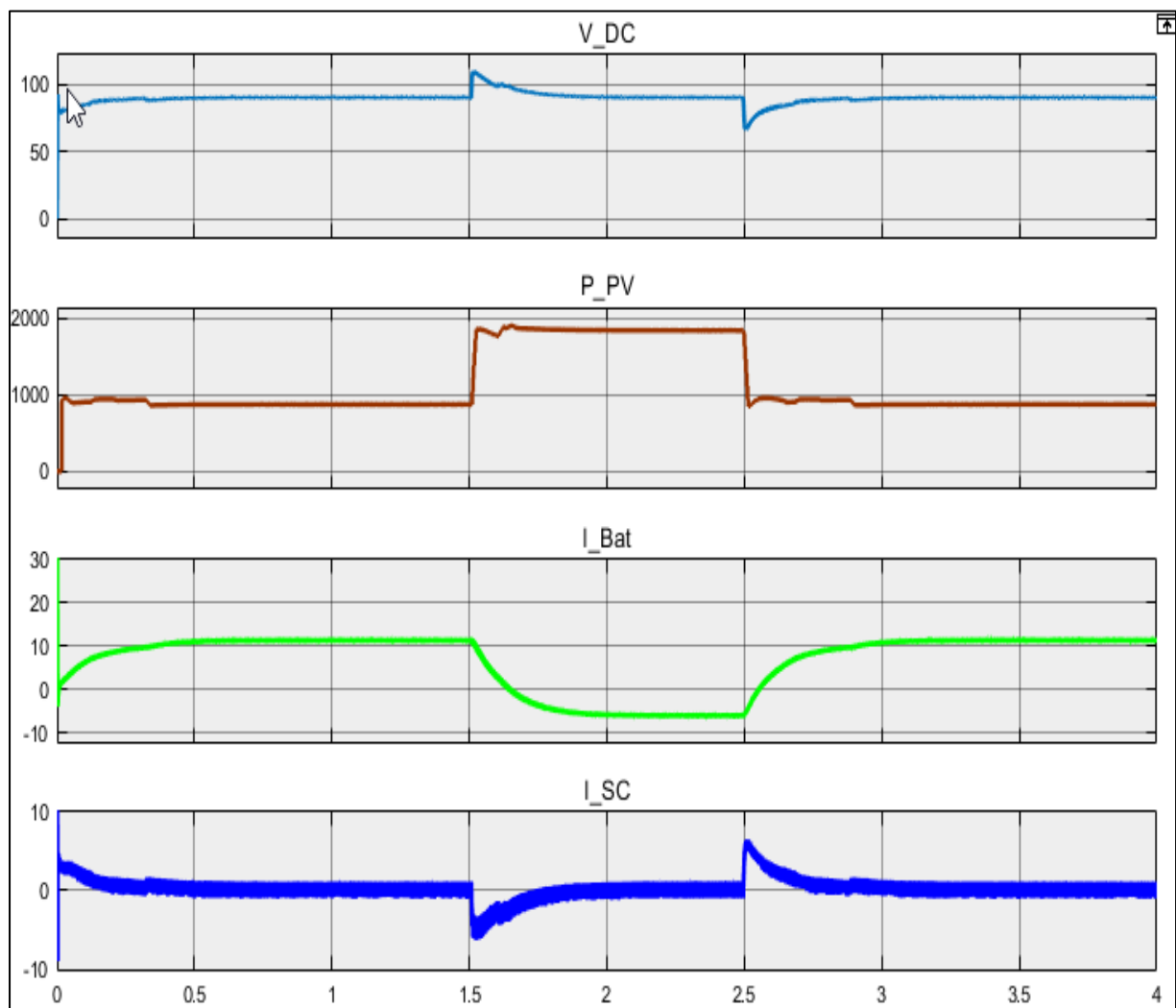


Fig. 64 Curvas de voltaje DC, Potencia Fotovoltaica, Corriente de las baterías, Corriente de los supercapacitores, Fuente: Matlab Simulink. (Autor 2020).

### 3.7.2 Caso 2. Variación en la carga

La corriente de la carga sube de 8.3 a 16.6 amperios el voltaje cae por debajo de los 90 voltios el sistema restablece la corriente, el supercapacitor asume el pico, la corriente de la batería sube paulatinamente, si la corriente de la carga disminuye el voltaje el supercapacitor

asume la descarga y la batería se restablece la corriente, el voltaje se eleva y el control bidireccional del supercapacitor y batería actúa para estabilizarlo.

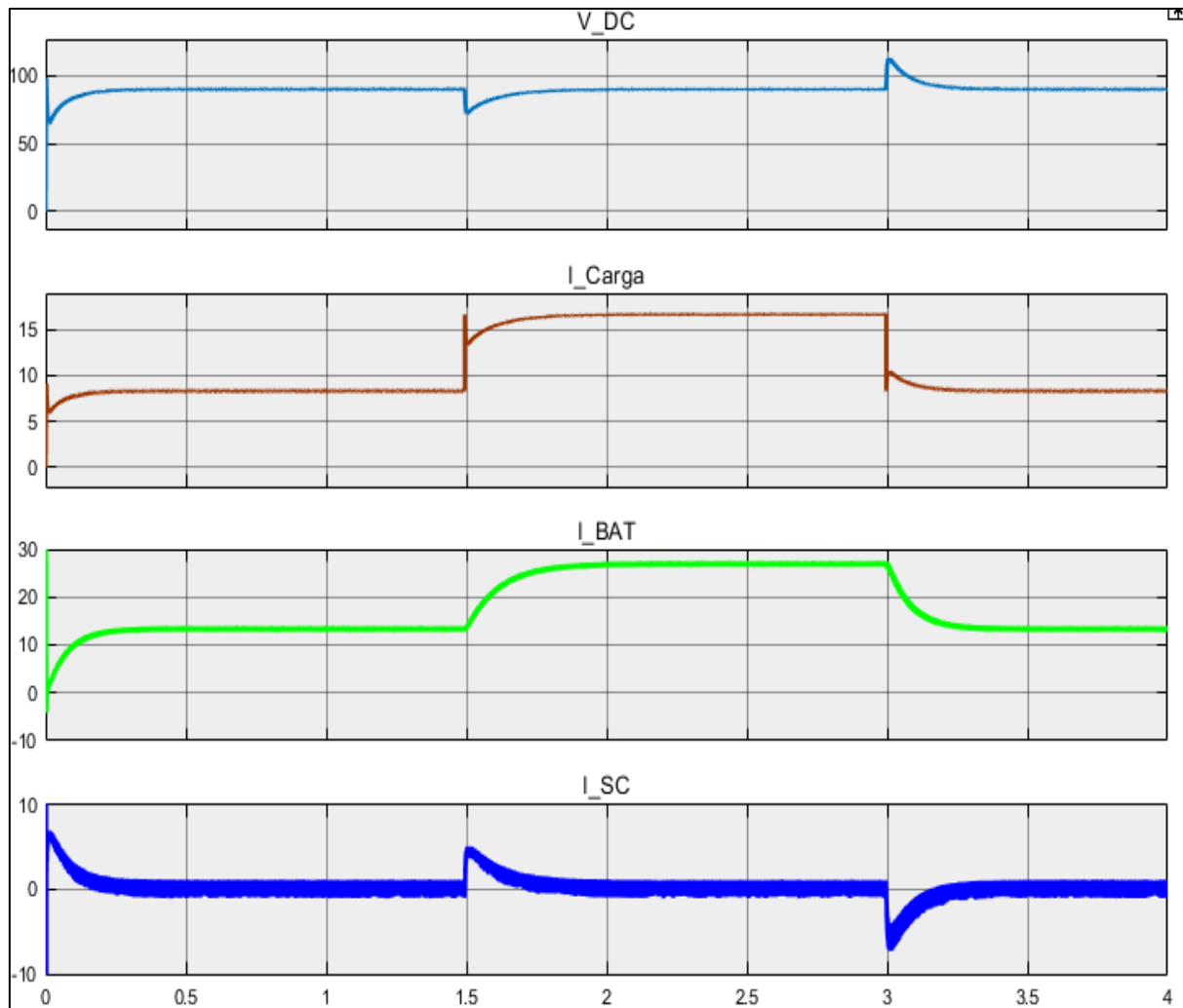


Fig. 65 Curvas de voltaje DC, Corriente de la carga, Corriente de las baterías, Corriente de los supercapacitores.  
Fuente: Matlab Simulink (Autor 2020).

En la figura 66 se muestra el voltaje de la carga que es de 90V, el banco de supercapacitores de 48V y el banco baterías 55V respectivamente, se observa que el voltaje de los sistemas se encuentra en los valores prestablecidos por el diseño de capítulo II, con el detalle de que cada curva presenta un cambio de voltaje ante una variación de la carga el supercapacitor permanece estable y varía en pequeños instantes cuando la carga varía. El sistema presenta la reacción del voltaje en la carga y un sobreimpulsó de 10 V cuando existe presencia de generación fotovoltaica figura 67.

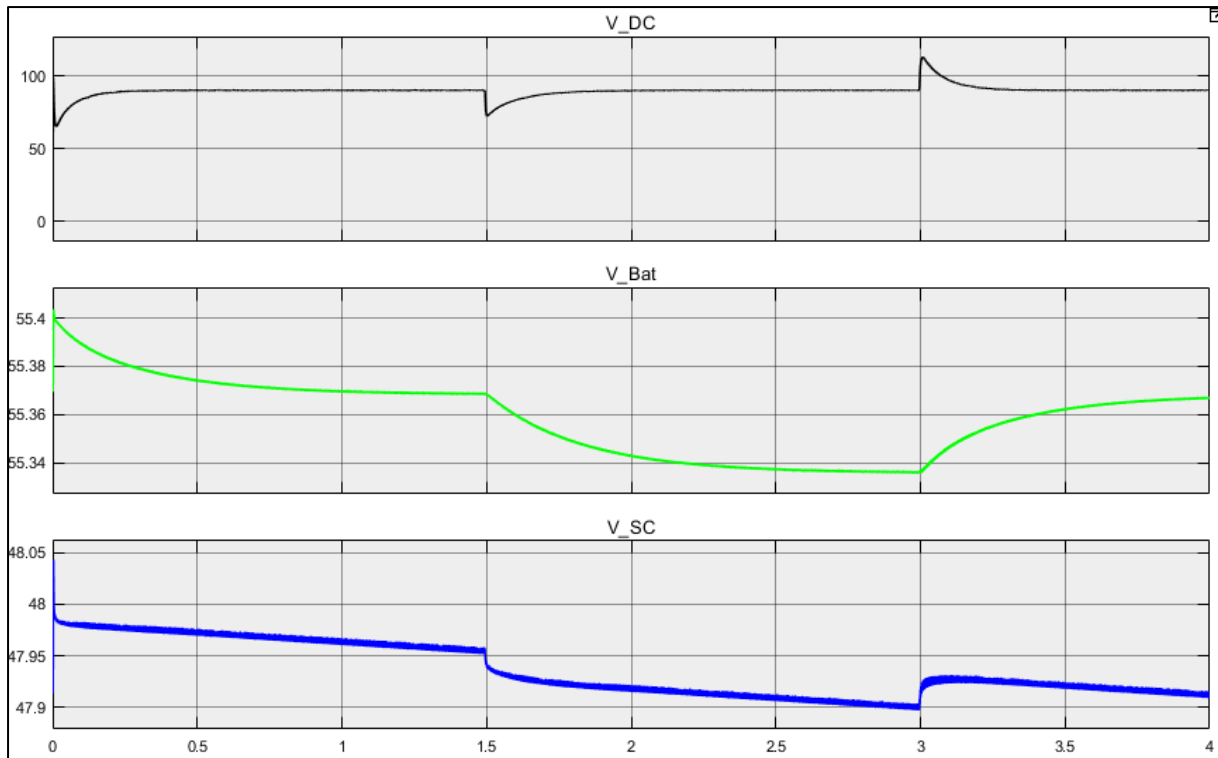


Fig. 66 Curva de voltaje de la Carga, Batería y Supercapacitor.  
Fuente: Matlab Simulink (Autor,2020).

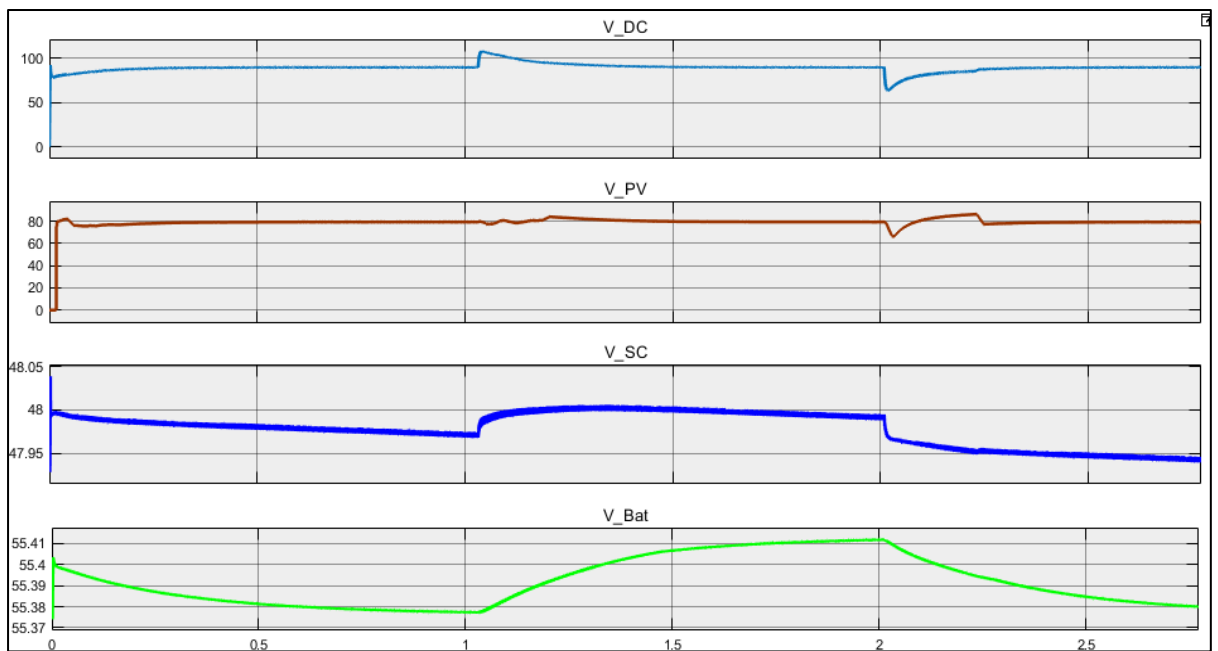


Fig. 67 Curva de voltaje de la Carga, Batería y Supercapacitor.  
Fuente: Matlab Simulink (Autor,2020).

En la figura 68 se evidencia la variación de potencia en la carga y en los sistemas de almacenamiento, en las curvas se aprecia como el supercapacitor actúa de manera inmediata ante la variación de potencia de la carga, aunque la respuesta es leve contribuye a que el comportamiento de la curva de potencia de la batería sea más suave.

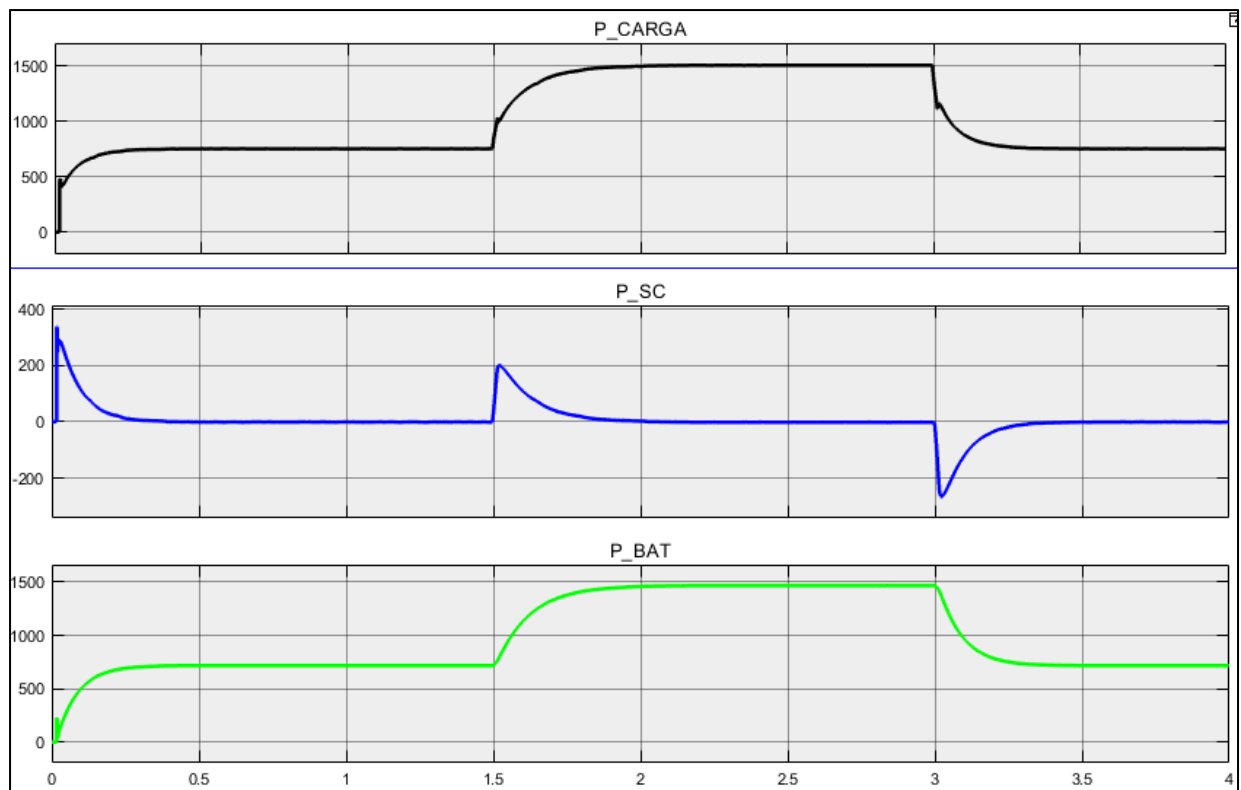


Fig. 68 Potencias de la Carga, Supercapacitor, Batería.  
Fuente: Matlab Simulink (Autor,2020).

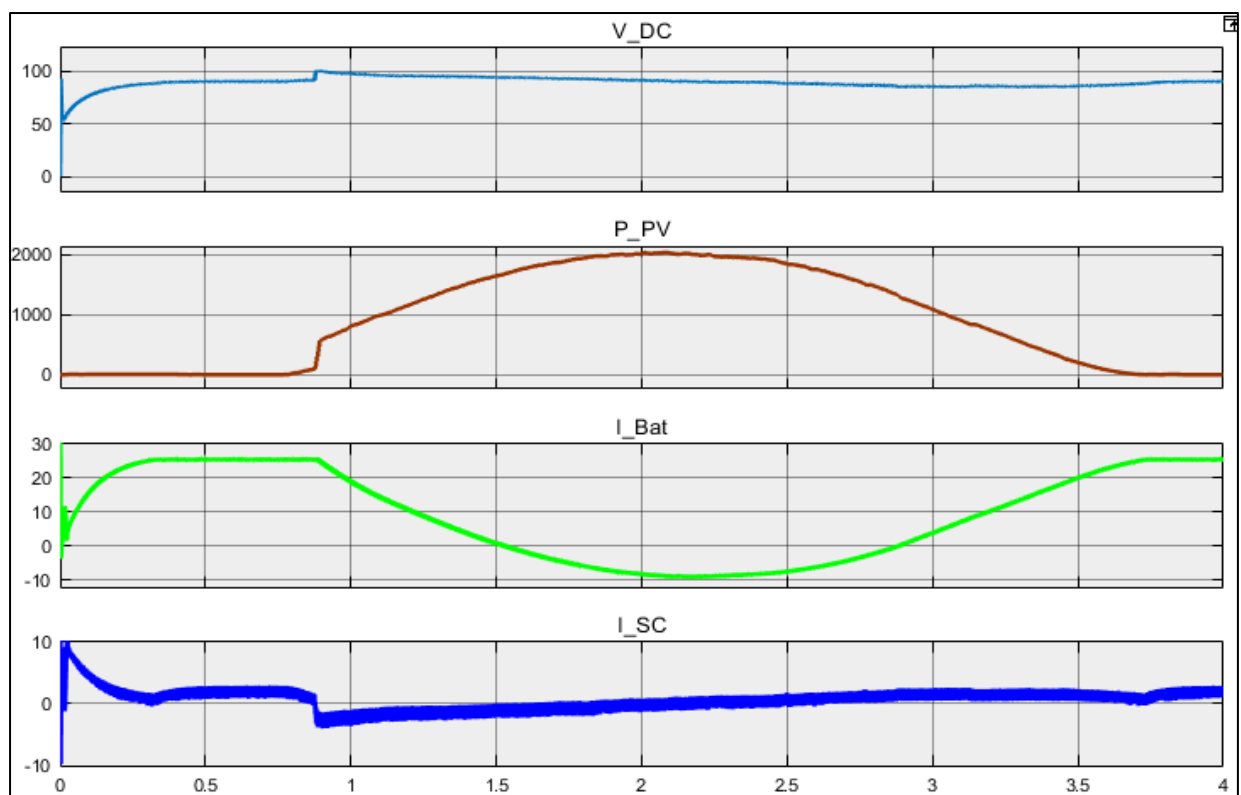


Fig. 69 Voltaje de la carga, generación tipo "Bell", corriente del banco de baterías, corriente del banco de supercapacitores.  
Fuente: Matlab Simulink (Autor,2018).

### 3.10 Resumen del capítulo III.

En este capítulo, se evidencia los resultados de la topología y la estrategia de control propuesta, los resultados revelan que al tener una demanda variable una fracción de la corriente de la batería se desvía al supercapacitor debido a esto hay una reducción significativa de las tasas de carga y descarga de la corriente de la batería por lo que aumenta su vida útil considerablemente.

Una instalación con sistema de almacenamiento híbrido no solamente es más confiable sino que también es duradera. La Figura 70 muestra un diagrama completo del sistema ya diseñado en el software. En el capítulo se validó el diseño a través de la simulación y se implementó todos los sistemas.

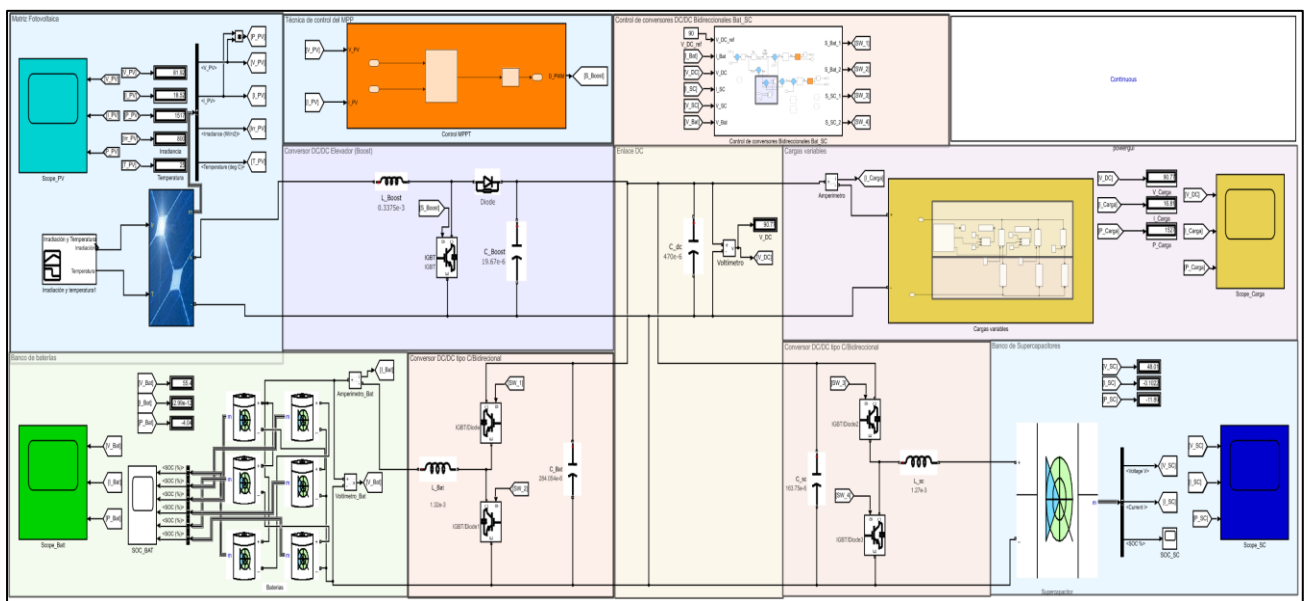


Fig. 70 Diseño del sistema en el software.  
Fuente: Matlab Simulink (Autor 2020).

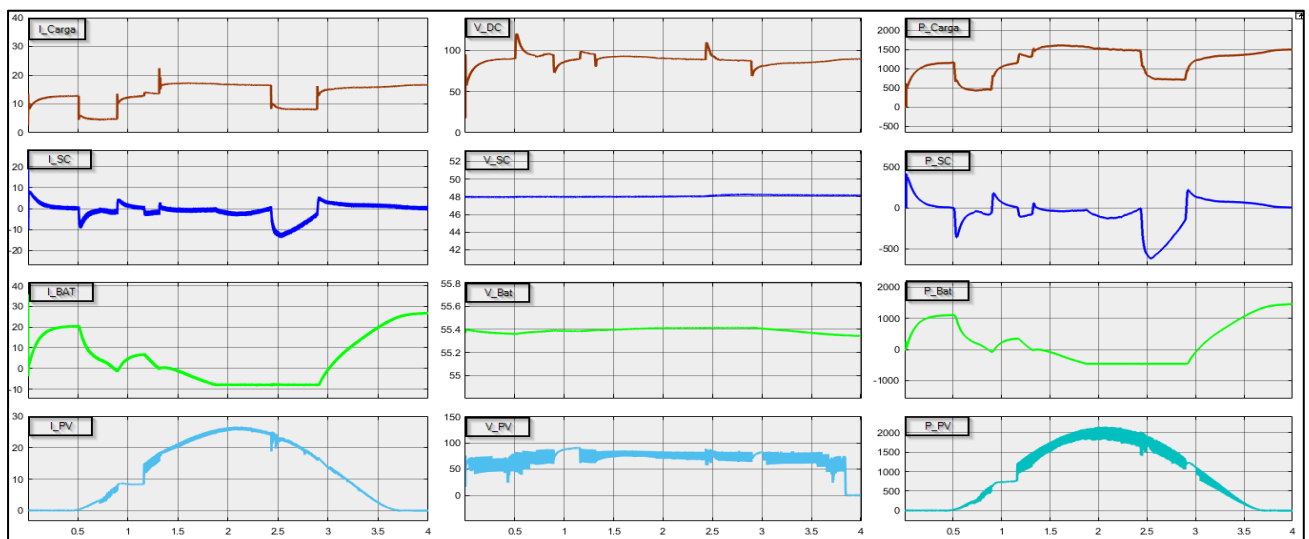


Fig. 71 Curvas de Voltaje, Corriente, Potencia  
Fuente: Matlab Simulink (Autor 2020).



## **Conclusiones**

- En este proyecto se ha realizado el estudio del sistema de almacenamiento híbrido enfocado a sistemas fotovoltaicos, conocer las bases de cada elemento de una micro red fotovoltaica permite a futuro realizar adecuadamente un buen dimensionamiento y diseño de un sistema. En conclusión los sistemas de almacenamiento de baterías y supercapacitores son sistemas muy complementarios, las baterías tienen altas densidades de energía los capacitores altas densidades de potencia, las esperanzas de vida de la batería son reducidas por las altas descargas de corriente y fluctuaciones de altas potencias, mientras que los capacitores soportan cargas y descargas de corriente altas.
- El diseño de la instalación y la topología permite demostrar el uso de almacenamiento híbrido. La instalación cuenta con baterías de ion litio, supercapacitores paneles fotovoltaicos y convertidores, cada uno de estos elementos son diseñados de acuerdo con el medio tomando en cuenta, irradiación, temperatura, potencia de la carga corrientes, voltaje, tiempo de trabajo.
- Finalmente, la correlación entre los resultados teóricos y resultados en la simulación son muy buenos y similares, La combinación de supercapacitor y baterías en un sistema de almacenamiento es claramente positiva con mejoras significativas. Los supercapacitores aumentan la vida útil de la batería al reducir el consumo de energía de estas, los cambios instantáneos del supercapacitor entran en acción por lo tanto la corriente de la batería en esos instantes no es tan pronunciada y en fin se reducen los cambios bruscos de la corriente sobre la batería. Las cargas eléctricas que contienen motores pueden tener picos de potencia de entre 3 a más veces su potencia nominal de arranque. Por lo que un sistema híbrido puede controlar y soportar dichos picos de potencia.

## **Recomendaciones**

- El estudio de sistemas fotovoltaicos es amplio se recomienda para futuras investigaciones considerar una distinta topología de las presentadas en este proyecto comparar y discutir los resultados.
- El diseño adecuado de la instalación es muy fundamental de aquel depende parte de la eficiencia y mejoramiento de la instalación fotovoltaica, determinar la aplicación para el sistema de almacenamiento es primordial, ya que baterías de ion litio, supercapacitores, Paneles fotovoltaicos y Convertidores económicamente no son baratos, es recomendable realizar un análisis técnico económico para sustentar de mejor manera la parte eficiente del sistema, por otra parte pensar que estamos en

una zona ecuatorial óptima para la generación fotovoltaica no quiere decir que en todo el Ecuador funcione adecuadamente existe factores ambientales como el clima nublado, donde no conviene implementar dicho diseño.

- Un punto clave es que cuando no hay generación fotovoltaica por ejemplo en la noche las baterías cargan el banco de supercapacitores lo que reduce el SOC y el voltaje de la batería, para un futuro sería necesario modificar el sistema para contrarrestar este problema ya que es importante preservar el SOC de la batería.

## Bibliografía

- ABB Baldor Reliancer. (2019). *Motor dc 90V1HP* (pp. 1–10). pp. 1–10. Retrieved from <https://www.baldor.com/brands/baldor-reliance>
- Abella, A. M. (2005). *Sistemas fotovoltaicos* (p. 60). p. 60. Retrieved from [http://api.eoi.es/api\\_v1\\_dev.php/fedora/asset/eoi:45337/componente45335.pdf](http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45337/componente45335.pdf)
- Adel A. Elbaset, M. S. H. (2017). *Design and Power Quality Improvement of Photovoltaic Power System*.
- ARCONEL. (2018). 2018. Retrieved from <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/boletines-estadisticos/>
- Asamblea Nacional República del Ecuador. (2019). *Ley orgánica de eficiencia energética*. 8.
- Astudillo, W., & Lema, O. (2017). *Simulación de un Sistema Fotovoltaico*.
- Ávila, L., Parra, Q. G., Arnie, L., Okhuysen, P., Reyna, J. M., & Antonio, J. (2018). *Inversor DC - AC : diseño y simulación de 24V DC a 110V AC con R de 20Ω*. 1–8.
- Ávila, P. (2017). *Diseño y simulación de un control en cascada (PI deslizante) para los convertidores DC-DC presentes en una planta virtual de generación de energía eléctrica*.
- Barker, P. P. (2002). Ultracapacitors for use in power quality and distributed resource applications. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, 1(SUMMER), 316–320. <https://doi.org/10.1109/pess.2002.1043241>
- Burdick, J., & Philip, S. (2017). *Install your own solar panels*. North Adams, MA 01247: 30 de Junio del 2017.
- Cabrane, Z., Ouassaid, M., & Maaroufi, M. (2016). Analysis and evaluation of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for photovoltaic installation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(45), 20897–20907. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.141>
- Canchola Zamora, A., Vazquez, G., Sosa, J. M., Martinez-Rodriguez, P. R., & Juarez, M. A. (2017). Efficiency based comparative analysis of selected classical MPPT methods. 2017

- IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, ROPEC 2017, 2018-Janua(Ropez)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2017.8261657>
- Carmen, A. G. (2007). *El generador fotovoltaico*.
- Elbaset, A. A., Abdelwahab, S. A. M., Ibrahim, H. A., & Eid, M. A. E. (2019). Performance Analysis of Photovoltaic Systems with Energy Storage Systems. In *Performance Analysis of Photovoltaic Systems with Energy Storage Systems*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-20896-7>
- Fernández, A. H. (2015). *Aplicación de supercondensadores para la hibridación de almacenamiento de energía*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Glenn, J. H. (2019). *Photovoltaic Power Station With Ultracapacitors for Storage Ultracapacitors offer advantages over batteries in this application* . (August 2003), 11–12.
- González, J. M., Domínguez, J. A., Ruiz, J. M., & Alonso, C. (2016). Ultracapacitors utilization to improve the efficiency of photovoltaic installations. *Solar Energy*, 134, 484–493. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.051>
- Guerrero Pérez, R. (2017). *Replanteo y funcionamiento de las instalaciones solares fotovoltaicas*. (2nd ed.). Retrieved from <http://ebookcentral.proquest.com/lib/utnortesp/detail.action?docID=5350067>
- Guo, F., & Sharma, R. (2016). Hybrid Energy Storage Systems integrating battery and Ultracapacitor for the PJM frequency regulation market. *IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2016-Novem*, 0–3. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741867>
- Hameed, W. I., Saleh, A. L., Sawadi, B. A., Al-Yasir, Y. I. A., & Abd-Alhameed, R. A. (2019). Maximum power point tracking for photovoltaic system by using fuzzy neural network. *Inventions*, 4(3). <https://doi.org/10.3390/inventions4030033>
- IEA, I. E. agency. (2019). *Snapshot of global PV markets*. Retrieved from [http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS\\_T1\\_35\\_Snapshot2019-Report.pdf](http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_T1_35_Snapshot2019-Report.pdf)
- Jamshidpour, E. (2018). *Contribution à l ' étude de la sûreté de fonctionnement et de la continuité de service des bus DC Ehsan Jamshidpour To cite this version : HAL Id : tel-01750759 soutenance et mis à disposition de l ' ensemble de la Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorra*.
- Jamshidpour, E., & Saadate, S. (2016). Energy Management and Control of a Stand-Alone. *Jordan Journal of Electrical Engineering*, 2(1), 12.
- Jing, W., Lai, C. H., Wong, W. S. H., & Wong, M. L. D. (2018). A comprehensive study of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for standalone PV power system in rural electrification. *Applied Energy*, 224(August), 340–356. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.106>
- Kaushika, N. D., Mishra, A., & Rai, A. K. (2018). *Solar Photovoltaics*. India.

- Khalid, M. (2019). A review on the selected applications of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for microgrids. In *Energies* (Vol. 12). <https://doi.org/10.3390/en12234559>
- Liu, H., Mao, C., Lu, J., & Wang, D. (2009). Electronic power transformer with supercapacitors storage energy system. *Electric Power Systems Research*, 79(8), 1200–1208. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2009.02.012>
- Majid Jamil, M Rizwan, D. P. K. (2018). *Grid Integration of Solar Photovoltaic Systems*.
- Malo Rojas, J. E. (2015). *Simulación en tiempo real de un sistema de almacenamiento de energía a base de baterías*.
- Mateo, V. M. (2016). *Gestión de montaje de instalaciones solares Fotovoltaicas*.
- Maxwell. (2019). *BC SERIES ULTRACAPACITORS*. 1–9.
- Mera, I. G. (2009). *DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS*. Universidad de Sevilla.
- Messenger, R. A. (2018). Photovoltaic Systems Engineering. In *Photovoltaic Systems Engineering*. <https://doi.org/10.1201/9781315218397>
- Miñambres-Marcos, V. M., Guerrero-Martínez, M. Á., Barrero-González, F., & Milanés-Montero, M. I. (2017). A Grid Connected Photovoltaic Inverter with Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 17(8), 1856. <https://doi.org/10.3390/s17081856>
- Moghaddam, S. H. A., Ayatollahi, A., & Rahmati, A. (2012). Modeling and Current Programmed Control of a Bidirectional Full Bridge DC-DC Converter. *Energy and Power Engineering*, 04(03), 107–116. <https://doi.org/10.4236/epe.2012.43015>
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2009). *Electrónica de potencia : convertidores, aplicaciones y diseño* (3rd ed.). Retrieved from <http://ebookcentral.proquest.com/lib/utnortesp/detail.action?docID=4586428>
- Of, S., & Photovoltaic, G. (2018). *SNAPSHOT OF GLOBAL PHOTOVOLTAIC MARKETS Report IEA PVPS T1-33:2018*. 1–16.
- Onsemi. (2019). *AFGHL50T65SQDC Hybrid IGBT 50 A , 650 V*.
- Oscar Perpíñan Lamigueiro. (2011). *Energía solar fotovoltaica*.
- Pirouz, A., & Noroozian, R. (2016). Model predictive control of classic bidirectional DC-DC converter for battery applications. *7th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, PEDSTC 2016, (Pedstc)*, 517–522. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC.2016.7556914>
- Power, F. S. (2018). *Global Market Outlook*.
- Punna, S., & Manthathi, U. B. (2020). Optimum design and analysis of a dynamic energy management scheme for HESS in renewable power generation applications. *SN Applied Sciences*, 2(3), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2313-3>

- Rashid, M. H. (2015). *Electronica de Potencia* (Cuarta edi; P. Educación, Ed.). Mexico.
- Recalde, M. Y., Bouille, D. H., & Girardin, L. O. (2015). Limitaciones para el desarrollo de energías renovables en argentina. *Problemas Del Desarrollo*, 46(183), 89–115. <https://doi.org/10.1016/j.rpd.2015.10.005>
- Rufer, A. (2017). Energy storage: Systems and components. In *Energy Storage: Systems and Components*. <https://doi.org/10.1201/b22265>
- Sánchez-Migallón, Á. C. (2016). *Sistemas de almacenamiento de energia basados en baterias y supercondensadores*.
- Santillan, A. (2016). Estudio de la incorporación de baterías en sistemas fotovoltaicos Màster en Energies Renovables i Sostenibilitat Energètica. *Ieee*, 2015–2016.
- Schupbach, R. M., & Balda, J. C. (2003). Comparing DC-DC converters for power management in hybrid electric vehicles. *IEMDC 2003 - IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 3(C), 1369–1374. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2003.1210630>
- Solargis. (2020). *Solargis Prospect*.
- SunPower. (2019). *SPR-240E-WHT-DE19 / 240 Solar Panel* (pp. 18–19). pp. 18–19.
- Tobajas Vázquez, C. (2018). *Energía solar fotovoltaica*. Retrieved from <http://ebookcentral.proquest.com/lib/utnortesp/detail.action?docID=5349504>
- Tocora, L. C. H., & Martínez, J. S. R. (2018). *SIMULACIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA APLICADOS EN MICRORREDES ELÉCTRICAS*. Universidad Distrital Francisco José de caldas.
- Vargas, F. (2018). *DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN UNA CENTRAL FOTOVOLTAICA MEDIANTE CONVERTORES DC/DC Y LA TÉCNICA DE CONTROL MPPT* (EPN). Retrieved from <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19591/1/CD-8988.pdf>
- Vitron Energy. (2019). *lithium*.

## Anexos

### Anexo A: Algoritmo perturbar y observar

```
%Implementación MATLAB de un algoritmo Perturbar and Observar
%para el seguimiento del punto de máxima potencia
% Universidad Técnica del norte
% Nombre: Luis Orbe
% Definir valores internos para el voltaje y la potencia
%como variables persistentes.
persistent Dprev Pprev Vprev
% Inicializa los valores internos para el voltaje y la potencia en la
primera pasada.
if isempty (Dprev)
    Dprev = 0.14;
    Vprev = 48;
    Pprev = 300;
end
% Inicializar parámetros del algoritmo
deltaD = 0.025;
% Calcular la potencia de la matriz medida
Ppv = Vpv*Ipv;
% Aumenta o disminuye el ciclo de trabajo según las condiciones
if (Ppv-Pprev) ~= 0
    if (Ppv-Pprev) > 0
        if (Vpv-Vprev) > 0
            D = Dprev - deltaD;
        else
            D = Dprev + deltaD;
        end
    else
        if (Vpv-Vprev) > 0
            D = Dprev + deltaD;
        else
            D = Dprev - deltaD;
        end
    end
else
    D = Dprev;
end
% Actualizar valores internos
Dprev = D;
Vprev = Vpv;
Pprev = Ppv;
```

## Anexo B. Funciones de transferencia para la estrategia de control.

```

FT_HEES.m FT_SC.m FT_Bat.m +
1 - clear all
2 - Vs=90;
3 - is=23.72;
4 - Vo=48.45;
5 - Ds=0.462;
6 - R=10.84;
7 - Ls=1.27e-3;
8 - C=163.75e-6;
9 - num=[Vo*C 2*(Vo/R)];
10 - den=[Ls*C Ls/R (1-Ds)^2];
11 - GidSC=tf(num,den)
12 - bode(GidSC)
13 - sisotool

```

Command Window

GidSC =

$$\frac{0.007934 s + 8.939}{2.08e-07 s^2 + 0.0001172 s + 0.2894}$$

Continuous-time transfer function.

```

FT_HEES.m FT_SC.m FT_Bat.m +
1 - clear all
2 - Vs=90;
3 - is=23.72;
4 - Vo=48.45;
5 - Ds=0.47;
6 - R=10.84;
7 - Ls=1.27e-3;
8 - C=163.75e-6;
9 - num=[(Ls*Ds-Ls)/((1-Ds)^2) (R-R*Ds)];
10 - den=[R*C 2];
11 - GidHESS=tf(num,den)
12 - bode(GidHESS)
13 - sisotool
14

```

Command Window

GidHESS =

$$\frac{-0.002396 s + 5.745}{0.001775 s + 2}$$

Continuous-time transfer function.

```

FT_HEES.m FT_SC.m FT_Bat.m +
1 - clear all
2 - Vb=51.2;
3 - ib=23.72;
4 - Vo=90;
5 - Db=0.43;
6 - R=10.84;
7 - Lb=1.32e-3;
8 - C=284.054e-6;
9 - num=[Vo*C 2*(Vo/R)];
10 - den=[Lb*C (Lb/R) (1-Db)^2];
11 - Gidbat=tf(num,den)
12 - bode(Gidbat)
13 - sisotool

```

Command Window

Gidbat =

$$\frac{0.02556 s + 16.61}{3.75e-07 s^2 + 0.0001218 s + 0.3249}$$

Continuous-time transfer function.

# SUNPOWER™

## E19 / 240 SOLAR PANEL

MAXIMUM EFFICIENCY AND PERFORMANCE

### BENEFITS

#### Highest Efficiency

SunPower™ Solar Panels are the most efficient photovoltaic panels on the market today.

#### More Power

Our panels produce more power in the same amount of space—up to 50% more than conventional designs and 100% more than thin film solar panels.

#### Reduced Installation Cost

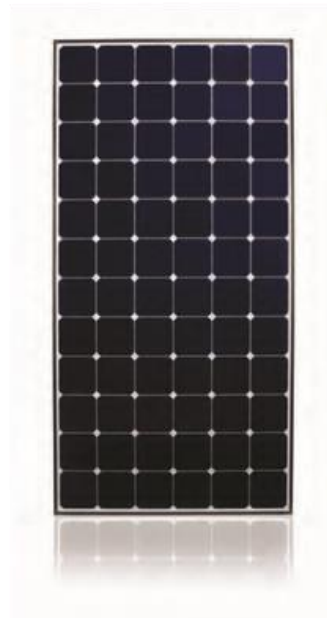
More power per panel means fewer panels per install. This saves both time and money.

#### Reliable and Robust Design

Proven materials, tempered front glass, and a sturdy anodized frame allow panel to operate reliably in multiple mounting configurations.

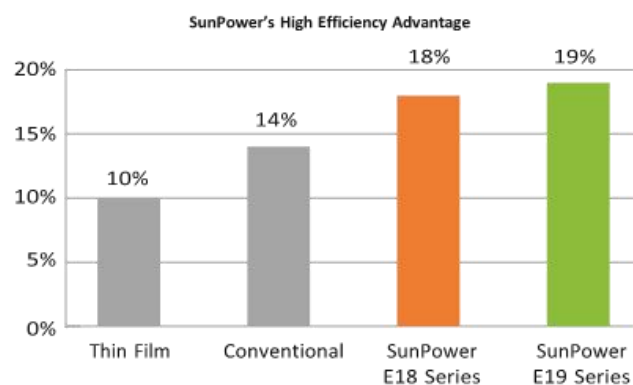


SPR-240E-WHT-D



**E19**  
SERIES

The SunPower™ 240 Solar Panel provides today's highest efficiency and performance. Utilizing 72 all back-contact solar cells, the SunPower 240 delivers a total panel conversion efficiency of 19.3%. The panel's reduced voltage-temperature coefficient, anti-reflective glass and exceptional low-light performance attributes provide outstanding energy delivery per peak power watt.





### Electrical Data

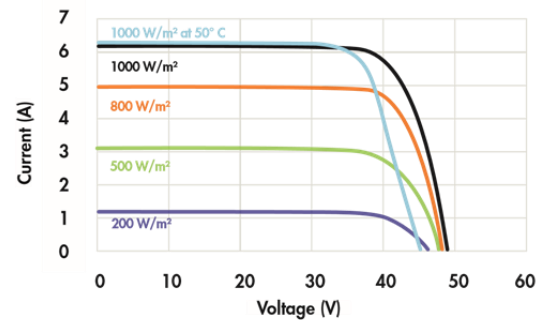
Measured at Standard Test Conditions (STC): Irradiance of 1000W/m², AM 1.5, and cell temperature 25° C

Peak Power (+5/-3%)	P <sub>max</sub>	240 W
Efficiency	η	19.3 %
Rated Voltage	V <sub>mpp</sub>	40.5 V
Rated Current	I <sub>mpp</sub>	5.93 A
Open Circuit Voltage	V <sub>oc</sub>	48.6 V
Short Circuit Current	I <sub>sc</sub>	6.30 A
Maximum System Voltage	UL	600 V
Temperature Coefficients	Power (P)	-0.38% / K
	Voltage (V <sub>oc</sub> )	-132.5mV / K
	Current (I <sub>sc</sub> )	3.5mA / K
NOCT		45° C +/-2° C
Series Fuse Rating		20 A

### Mechanical Data

Solar Cells	72 SunPower all-back contact monocrystalline
Front Glass	High transmission tempered glass with anti-reflective (AR) coating
Junction Box	IP-65 rated with 3 bypass diodes Dimensions: 32 x 155 x 128 (mm)
Output Cables	1000mm length cables / MultiContact (MC4) connectors
Frame	Anodized aluminum alloy type 6063 (black)
Weight	33.1 lbs. (15.0 kg)

### I-V Curve



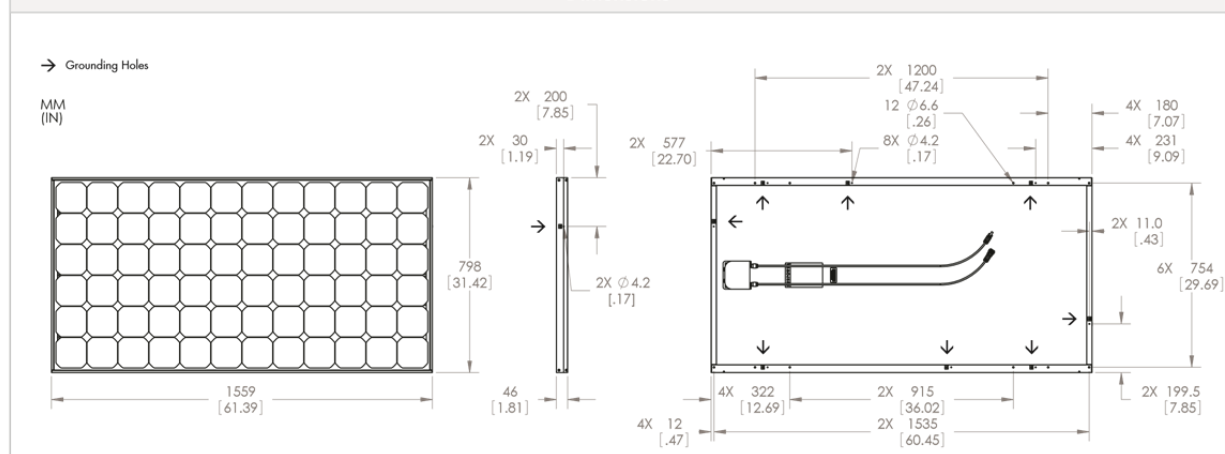
### Tested Operating Conditions

Temperature	-40° F to +185° F (-40° C to + 85° C)
Max load	113 psf 550kg/m² (5400 Pa) front – e.g. snow; 50 psf 245kg/m² (2400 Pa) front and back – e.g. wind
Impact Resistance	Hail 1 in (25 mm) at 52mph (23 m/s)

### Warranties and Certifications

Warranties	25 year limited power warranty 10 year limited product warranty
Certifications	Tested to UL 1703. Class C Fire Rating

### Dimensions



# 12,8 & 25,6Volt Lithium-Iron-Phosphate Batteries Smart With Bluetooth

www.victronenergy.com

## Why lithium-iron-phosphate?

Lithium-iron-phosphate (LiFePO<sub>4</sub> or LFP) is the safest of the mainstream li-ion battery types. The nominal voltage of a LFP cell is 3,2V (lead-acid: 2V/cell). A 12,8V LFP battery therefore consists of 4 cells connected in series; and a 25,6V battery consists of 8 cells connected in series.

### Rugged

A lead-acid battery will fail prematurely due to sulfation:

- If it operates in deficit mode during long periods of time (i.e. if the battery is rarely, or never at all, fully charged).
- If it is left partially charged or worse, fully discharged (yacht or mobile home during wintertime).

A LFP battery does not need to be fully charged. Service life even slightly improves in case of partial charge instead of a full charge. This is a major advantage of LFP compared to lead-acid.

Other advantages are the wide operating temperature range, excellent cycling performance, low internal resistance and high efficiency (see below).

LFP is therefore the chemistry of choice for very demanding applications.

### Efficient

In several applications (especially off-grid solar and/or wind), energy efficiency can be of crucial importance. The round trip energy efficiency (discharge from 100% to 0% and back to 100% charged) of the average leadacid battery is 80%.

The round trip energy efficiency of a LFP battery is 92%.

The charge process of lead-acid batteries becomes particularly inefficient when the 80% state of charge has been reached, resulting in efficiencies of 50% or even less in solar systems where several days of reserve energy is required (battery operating in 70% to 100% charged state).

In contrast, a LFP battery will still achieve 90% efficiency under shallow discharge conditions.

### Size and weight

Saves up to 70% in space

Saves up to 70% in weight

### Expensive?

LFP batteries are expensive when compared to lead-acid. But in demanding applications, the high initial cost will be more than compensated by longer service life, superior reliability and excellent efficiency.

### Bluetooth

With Bluetooth cell voltages, temperature and alarm status can be monitored.

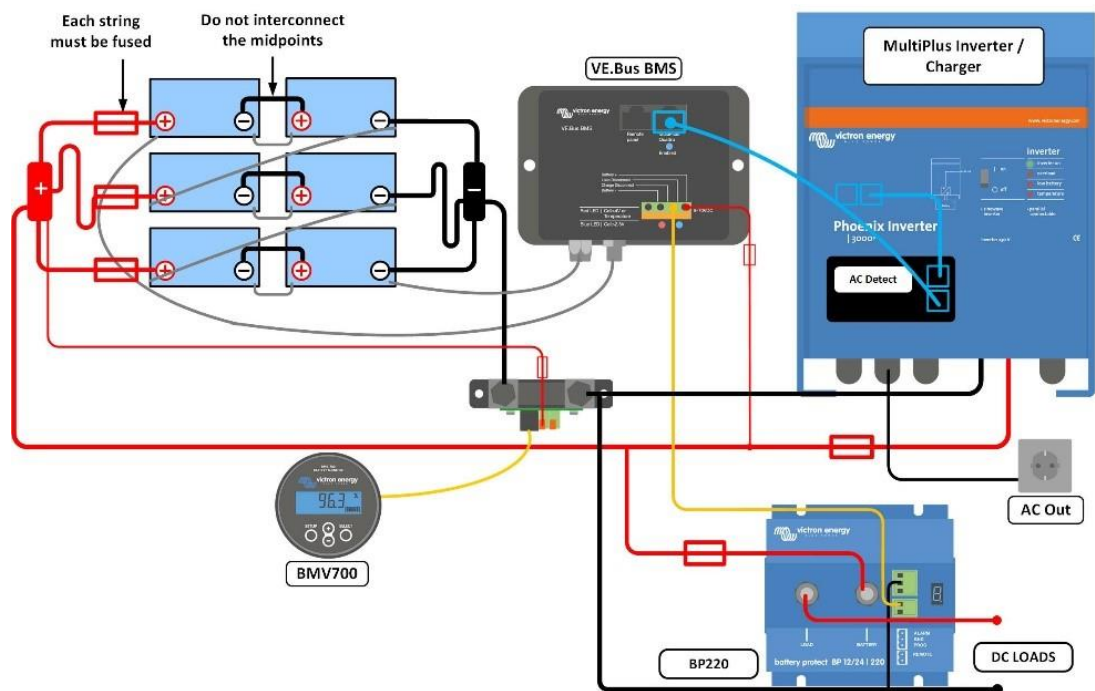
Very useful to localize a (potential) problem, such as cell

imbalance. Li-ion app



12,8V 300Ah LiFePO<sub>4</sub> Battery





Our LFP batteries have integrated cell balancing and cell monitoring. Up to 10 batteries can be paralleled and up to four 12V batteries or two 24V batteries can be series connected, so that a 48V battery bank of up to 3000Ah can be assembled. The cell balancing/monitoring cables can be daisy-chained and must be connected to a Battery Management System (BMS).

#### Battery Management

System (BMS) The BMS will:

1. Disconnect or shut down the load whenever the voltage of a battery cell decreases to less than 2,5V.
2. Stop the charging process whenever the voltage of a battery cell increases to more than 4,2V.
3. Shut down the system whenever the temperature of a cell exceeds 50°C.

See the BMS datasheets for more features

Battery specification								
VOLTAGE AND CAPACITY	LFP- Smart 12,8/60	LFP- Smart 12,8/100	LFP- Smart 12,8/150	LFP- Smart 12,8/160	LFP- Smart 12,8/200	LFP- Smart 12,8/200-a	LFP- Smart 12,8/300	LFP- Smart 25,6/200
Nominal voltage	12,8V	12,8V	12,8V	12,8V	12,8V	12,8V	12,8V	25,6V
Nominal capacity @ 25°C*	60Ah	100Ah	150Ah	160Ah	200Ah	200Ah	300Ah	200Ah
Nominal capacity @ 0°C*	48Ah	80Ah	125Ah	130Ah	160Ah	160Ah	240Ah	160Ah
Nominal capacity @ -20°C*	30Ah	50Ah	75Ah	80Ah	100Ah	100Ah	150Ah	100Ah
Nominal energy @ 25°C*	768Wh	1280Wh	1920Wh	2048Wh	2560Wh	2560Wh	3840Wh	5120Wh
*Discharge current ≤1C								
CYCLE LIFE (capacity ≥ 80% of nominal)								
80% DoD	2500 cycles							
70% DoD	3000 cycles							
50% DoD	5000 cycles							
DISCHARGE								
Maximum continuous discharge current	120A	200A	300A	320A	400A	400A	600A	400A

Recommended continuous discharge current	≤60A	≤100A	≤150A	≤160A	≤200A	≤200A	≤300A	≤200A
End of discharge voltage	11V	11V	11V	11V	11V	11V	11V	22V
OPERATING CONDITIONS								
Operating temperature	Discharge: -20°C to +50°C      Charge: +5°C to +50°C							
Storage temperature	-45°C to +70°C							
Humidity (non-condensing)	Max. 95%							
Protection class	IP 22							
CHARGE								
Charge voltage	Between 14V/28V and 14,4V/28,8V (14,2V/28,4V recommended)							
Float voltage	13,5V/27V							
Maximum charge current	120A	200A	300A	320A	400A	400A	600A	400A
Recommended charge current	≤30A	≤50A	≤75A	≤80A	≤100A	≤100A	≤150A	≤100A
OTHER								
Max storage time @ 25°C*	1 year							
BMS connection	Male + female cable with M8 circular connector, length 50cm							
Power connection (threaded inserts)	M8	M8	M8	M10	M10	M10	M10	M8
Dimensions (h x w x d) mm	240 x 285 x 132	197 x 321 x 152	237 x 321 x 152	320 x 338 x 233	297 x 425 x 274	237 x 321 x 152	347 x 425 x 274	317 x 631 x 208
Weight	12kg	15kg	20kg	33kg	42kg	22kg	51kg	56kg
*When fully charged								

Victron Energy B.V. | De Paal 35 | 1351 JG Almere | The Netherlands

General phone: +31 (0)36 535 97 00 | E-mail: [sales@victronenergy.com](mailto:sales@victronenergy.com) [www.victronenergy.com](http://www.victronenergy.com)



## Anexo E. Datasheet Supercapacitores.

DATASHEET

BC SERIES ULTRACAPACITORS

### FEATURES AND BENEFITS\*

- > Up to 500,000 duty cycles or 10 year life
- > Low internal resistance
- > High power performance
- > 310F and 350F capacitance values
- > Radial terminals for PCB mounting

### TYPICAL APPLICATIONS

- > Wind turbine pitch control
- > Automotive subsystems
- > Small UPS systems
- > Consumer and industrial electronics
- > Medical equipment
- > Portable tools

## PRODUCT SPECIFICATIONS

ELECTRICAL	BCAP0310	BCAP0350
Rated Capacitance <sup>1</sup>	310 F	350 F
Minimum Capacitance, initial <sup>1</sup>	310 F	350 F
Maximum ESR <sub>ec</sub> , initial <sup>1</sup>	2.2 mΩ	3.2 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR <sub>ec</sub> <sup>1</sup>	31 A	35 A
Rated Voltage	2.70 V	2.70 V / 2.50 V
Absolute Maximum Voltage <sup>2</sup>	2.85 V	2.85 V
Absolute Maximum Current	250 A	170 A
Leakage Current at 25°C, maximum <sup>3</sup>	0.45 mA	0.30 mA
TEMPERATURE		
Operating temperature range (Cell case temperature)		
Minimum	-40°C	-40°C
Maximum	65°C	65°C / 70°C
Storage temperature range (Stored uncharged)		
Minimum	-40°C	-40°C
Maximum	70°C	70°C
PHYSICAL		
Mass, typical	60 g	60 g
Terminals	Radial Tab	Radial Tab
Vibration	IEC 60068-2-6, SAE J2380	IEC 60068-2-6, SAE J2380
Shock	IEC 60068-2-27, SAE J2464	IEC 60068-2-27, SAE J2464
POWER & ENERGY	BCAP0310	BCAP0350
Usable Specific Power, P <sub>d</sub> <sup>4</sup>	6,600 W/kg	4,600 W/kg
Impedance Match Specific Power <sup>5</sup>	14,000 W/kg	9,500 W/kg
Specific Energy, E <sub>max</sub> <sup>6</sup>	5.2 Wh/kg	5.9 Wh/kg
Stored Energy <sup>7,11</sup>	0.31 Wh	0.35 Wh

\*Results may vary. Additional terms and conditions, including the limited warranty, apply at the time of purchase. See the warranty details and enclosed information for applicable operating and use requirements.

Page 1 > Document number: 1017105.4 > maxwell.com

**Maxwell**  
TECHNOLOGIES  
Enabling Energy's Future™

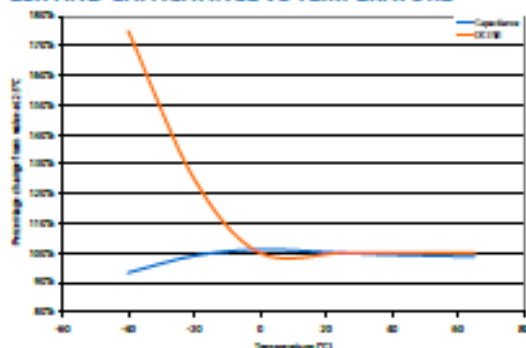
## PRODUCT SPECIFICATIONS (Cont'd)

SAFETY	BCAP0310	BCAP0350
Short Circuit Current, typical (Current possible with short circuit from rated voltage. Do not use as an operating current.)	1,200 A	840 A
Certifications	UL810a, RoHS	UL810a, RoHS

## TYPICAL CHARACTERISTICS

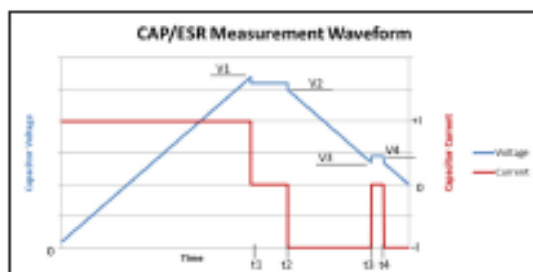
THERMAL CHARACTERISTICS		
Thermal Resistance ( $R_{\theta JA}$ , Case to Ambient), typical <sup>a</sup>	10.9°C/W	10.9°C/W
Thermal Capacitance ( $C_{\theta JA}$ ), typical <sup>a</sup>	60 J/°C	60 J/°C
Maximum Continuous Current ( $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$ ) <sup>a</sup>	25 A <sub>RM</sub>	21 A <sub>RM</sub>
Maximum Continuous Current ( $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$ ) <sup>a</sup>	41 A <sub>RM</sub>	34 A <sub>RM</sub>
LIFE		
DC Life at High Temperature <sup>a</sup> (at Rated Voltage & Maximum Operating Temperature)	1,500 hours	1,500 hours
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	100%	100%
Projected DC Life at 25°C <sup>1</sup> (held continuously at Rated Voltage)	10 years	10 years
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	100%	100%
Projected Cycle Life at 25°C <sup>1, 10/10</sup>	500,000 cycles	500,000 cycles
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	100%	100%
Test Current	31 A	35 A
Shelf Life (Stored uncharged at 25°C)	4 years	4 years

# ESR AND CAPACITANCE VS TEMPERATURE



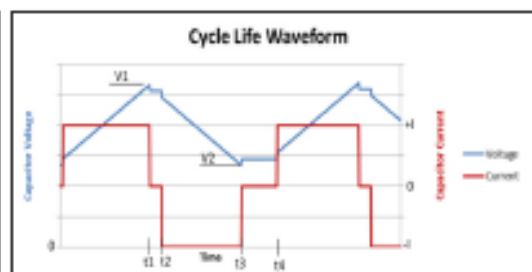
## NOTES

1. Capacitance and  $ESR_{DC}$  measured at 25°C using specified test current per waveform below.
2. Absolute maximum voltage, non-repeated. Not to exceed 1 second.
3. After 72 hours at rated voltage. Initial leakage current can be higher.
4. Per IEC 62391-2,  $P_d = \frac{0.12V^2}{ESR_{DC} \times \text{mass}}$
5.  $P_{max} = \frac{V^2}{4 \times ESR_{DC} \times \text{mass}}$
6.  $E_{max} = \frac{1}{2} CV^2$   
 $3,600 \times \text{mass}$
7.  $E_{stand} = \frac{1}{2} CV^2$   
 $3,600$
8.  $\Delta T = I_{RMS}^2 \times ESR \times R_{\theta JA}$
9. Cycle using specified test current per waveform below.
10. Cycle life varies depending upon application-specific characteristics. Actual results will vary.
11. Per United Nations material classification UN3499, all Maxwell ultracapacitors have less than 10 Wh capacity to meet the requirements of Special Provisions 361. Both individual ultracapacitors and modules composed of those ultracapacitors shipped by Maxwell can be transported without being treated as dangerous goods (hazardous materials) under transportation regulations.



$$V1 = V_{rated} \quad t2 - t1 = 15 \text{ seconds} \quad \text{Capacitance} = 1 \times (t3 - t2) / (V2 - V3)$$

$$V3 = 0.5 \times V_{rated} \quad t4 - t3 = 5 \text{ seconds} \quad ESR = (V4 - V3) / I$$



$$V1 = V_{rated} \quad t2 - t1 = 5 \text{ seconds } (I=0)$$

$$V2 = 0.5 \times V_{rated} \quad t4 - t3 = 15 \text{ seconds } (I=0)$$

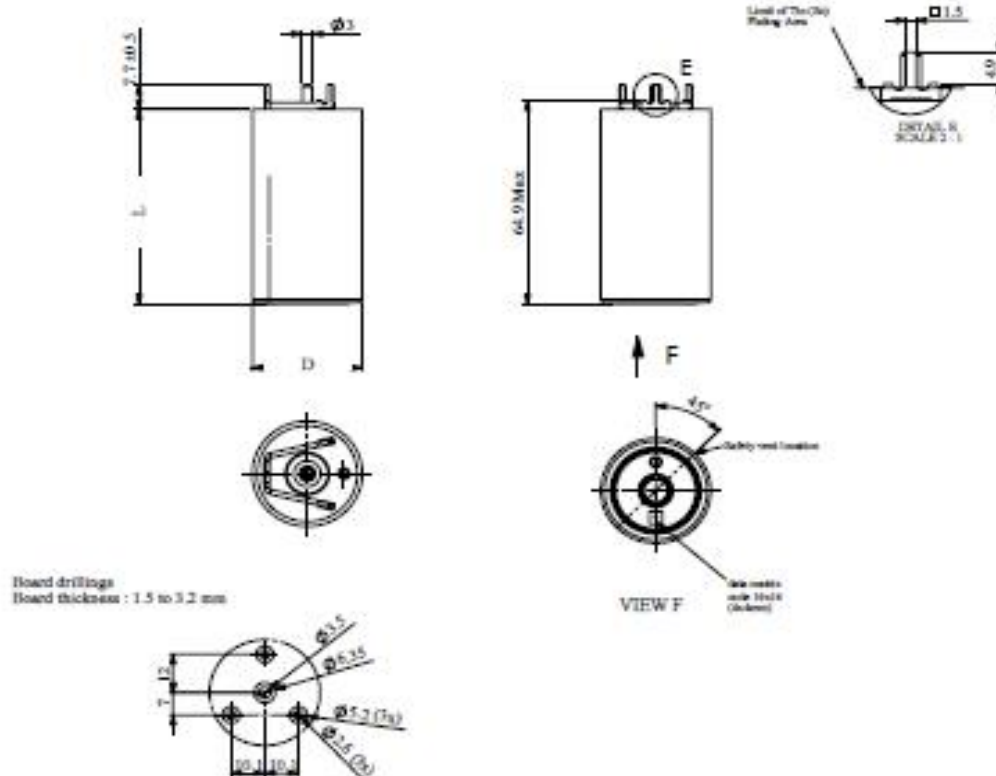
## MOUNTING RECOMMENDATIONS

Do not reverse polarity. Please refer to document number 1008238, available at [maxwell.com](http://maxwell.com) for soldering recommendations.

### MARKINGS

Products are marked with the following information:  
Rated capacitance, rated voltage, product number,  
name of manufacturer, positive terminal, warning  
marking, serial number.

## BCAP0350 E270 T11

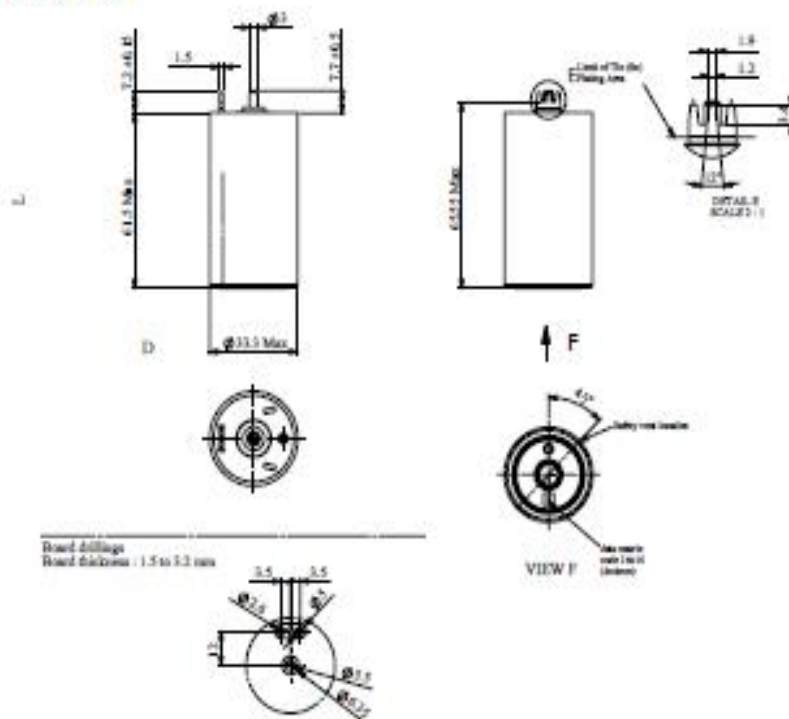


Part Description	Dimensions (mm)		Package Quantity
	L (max)	D (max)	
BCAP0350 E270 T11	61.5	33.3	250

Product dimensions are for reference only unless otherwise identified. Product dimensions and specifications may change without notice. Please contact Maxwell Technologies directly for any technical specifications critical to application.



## BCAP0310 P270 T10



Part Description	Dimensions (mm)		Package Quantity
	L (max)	D (max)	
BCAP0310 P270 T10	61.5	33.3	250

Product dimensions are for reference only unless otherwise identified. Product dimensions and specifications may change without notice. Please contact Maxwell Technologies directly for any technical specifications critical to application. All products featured on this datasheet are covered by the following U.S. patents and their respective foreign counterparts: 6640119, 7295423, 7307830, 7342770, 7352558, 7384433, 7492571, 7508651, 7791860, 7791861, 7883553, 7925153, 8072734, 8279580, and patents pending.



Maxwell Technologies Korea, Ltd.  
Room 1524, D-Cube City  
Office Tower, 15F #662  
Gyeongin-Ro, Guro-Gu,  
Seoul, 152-706  
South Korea  
Phone: +82 10-4518 9829

MAXWELL TECHNOLOGIES, MAXWELL, MAXWELL CERTIFIED INTEGRATOR, UNLEASHING ENERGY'S FUTURE, BOOSTAC+ CELL, D CELL and their respective designs and/or logos are either trademarks or registered trademarks of Maxwell Technologies, Inc. and may not be copied, imitated or used, in whole or in part, without the prior written permission of Maxwell Technologies, Inc. All contents copyright © 2014 Maxwell Technologies, Inc. All rights reserved. No portion of these materials may be reproduced in any form, or by any means, without prior written permission from Maxwell Technologies, Inc.

Page 5 : Document number: 1017105.4 : maxwell.com



**Maxwell**  
TECHNOLOGIES  
Enabling Energy's Future<sup>®</sup>

**BALDOR® • RELIANCE** 

**Paquete de información de producto**

**CDPX3545**

**MOTOR 1 HP 1750 RPM NEMA 56C**

Copyright © De no indicarse lo contrario, toda la información de productos de este documento está sujeta a protección de copyright © Baldor Electric Company.

Detalle producto							
Revisión:	AD	Estado:	PRD/A	Núm. cambio:		Propietario:	No
Tipo:	DC	Prod. Tipo:	3536P	Spec elec.:	35WGZ235	Diagrama Conexión:	CD0194
Encerramiento:	XPFC	Planta fabr.:		Spec Mec.:	3SP565	Diseño:	3SLYP565
Armazón:	56C	Montaje:	F1	Polos:	00	Fecha de creación:	
Base:	RG	Rotación:	R	Aislamiento:	F	Efec. Fecha:	01-04-2020
Tipo de Campo:		Literatura:		Diagrama eléctrico:		Reemplazado por:	

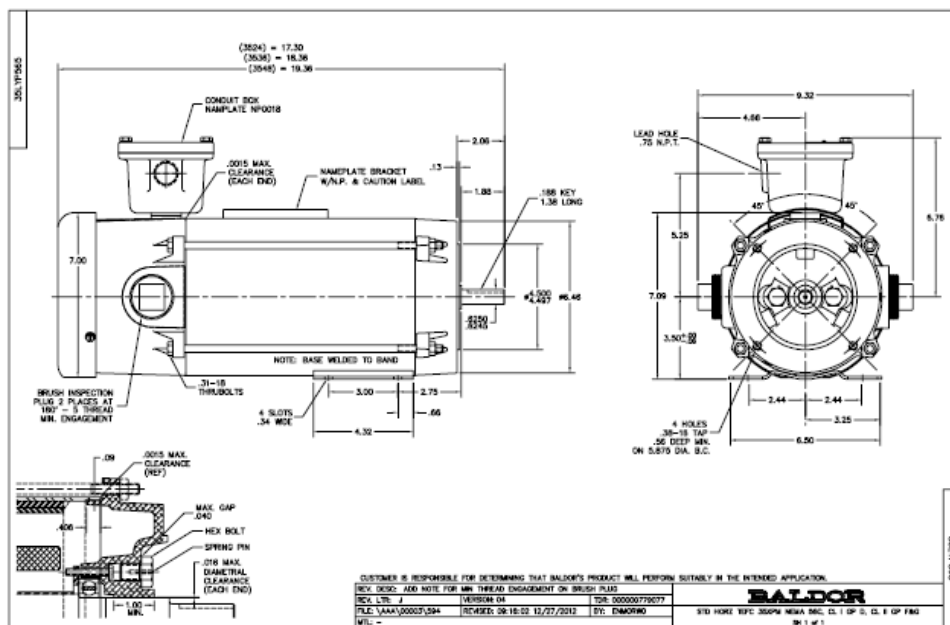
Specs			
Enclosure:	XPFC		
Frame:	56C		
Frame Material:	Steel		
XP Class and Group:	CL I GP D; CL II GP F,G		
Agency Approvals:	CSA		
	UL		
	UR		
Base Indicator:	Rigid		
Bearing Grease Type:	Polyrex EM (-20F +300F)		
Drip Cover:	No Drip Cover		
Duty Rating:	CONT		
Feedback Device:	NO FEEDBACK		
Heater Indicator:	No Heater		
Insulation Class:	F		
Lifting Lugs:	No Lifting Lugs		
Motor Lead Quantity/Wire Size:	2 @ 14 AWG		

**DC Motor Performance Data**  
Record # 1414 - Typical performance - not guaranteed values

Winding: 35WGZ235-R011		Type: 3536P		Enclosure: TEFC	
Nameplate Data			General Characteristics		
Rated Output (HP)	1		Armature Resistance @ 25°C	0.245 Ω	
R.P.M.	1750				
Armature Volts	90		Voltage Constant	50.01 v/krpm	
Armature Amps	9.6				
Field Volts			Armature Inductance	3.789 mH	
Field Amps			Armature Inertia	30.3419 LI²	
Rating - Duty	40C AMB-CONT				
Power Supply Code	K				

**Load Characteristics at 90 Armature Volts**

Load Point	1	2	3	4	5	6	7
Armature Amps	1	3.3	4.5	8	10.1	12.3	14.8
R.P.M.	1930	1926	1919	1865	1850	1756	1745
Torque ( LB-FT )	0	0.75	1.15	2.25	3	3.75	4.5



Placa NP0727XPSL			
NO.			
SER.			
SPEC.	35P565Z35G1		
CAT.NO.	CDPX3545	T. CODE	T3C
HP	1	ENCL	XPFC
RPM	1750		
FRAME	56C	TYPE	3536P
ARM V	90	ARM A	9.6
FLD V		FLD A	
INSUL	F	AMB.	40
DUTY	CONT	SUPPLY	K
BRG/DE	6205	BRG/ODE	6203
BRUSHES	2BPS03SCD1		
BLANK			

## 4 Solar y meteo: Estadísticas mensuales

El parámetro meteorológico local más importante que determina la producción eléctrica es la radiación solar, la cual alimenta la instalación fotovoltaica. La producción eléctrica también está influenciada por la temperatura del aire. Otros parámetros meteorológicos también afectan al rendimiento, disponibilidad y envejecimiento de la instalación.

**Tabla 4.1:** Radiación solar y parámetros meteorológicos

Mes	GHI kWh/m <sup>2</sup> por día	DNI kWh/m <sup>2</sup> por día	DIF kWh/m <sup>2</sup> por día	D2G	TEMP °C	WS m/s	CDD Grados día	HDD Grados día
Ene	4.728	3.683	2.371	0.50	13.2	1.9	2	178
Feb	4.453	3.008	2.437	0.55	13.3	1.8	1	155
Mar	4.702	2.980	2.662	0.57	13.3	1.8	0	172
Abr	4.724	3.313	2.477	0.52	13.4	2.0	0	170
May	4.642	3.430	2.402	0.52	13.3	2.4	0	191
Jun	4.480	3.357	2.366	0.53	12.6	3.1	0	199
Jul	4.592	3.471	2.388	0.52	12.3	3.6	0	212
Ago	4.567	3.198	2.450	0.54	12.5	3.6	1	211
Sep	4.929	3.518	2.530	0.51	13.0	2.9	2	201
Oct	5.023	3.781	2.465	0.49	13.4	2.0	1	185
Nov	4.847	3.817	2.350	0.48	13.4	1.8	1	162
Dic	4.555	3.607	2.298	0.50	13.3	1.9	1	179
Anual	4.688	3.433	2.433	0.52	13.1	2.4	10	2216